علم المواد الهندسية

المهندس
محمود أحمد عمري
جامعة البلقاء التطبيقية – كلية الهندسة –
قسم الميكانيك

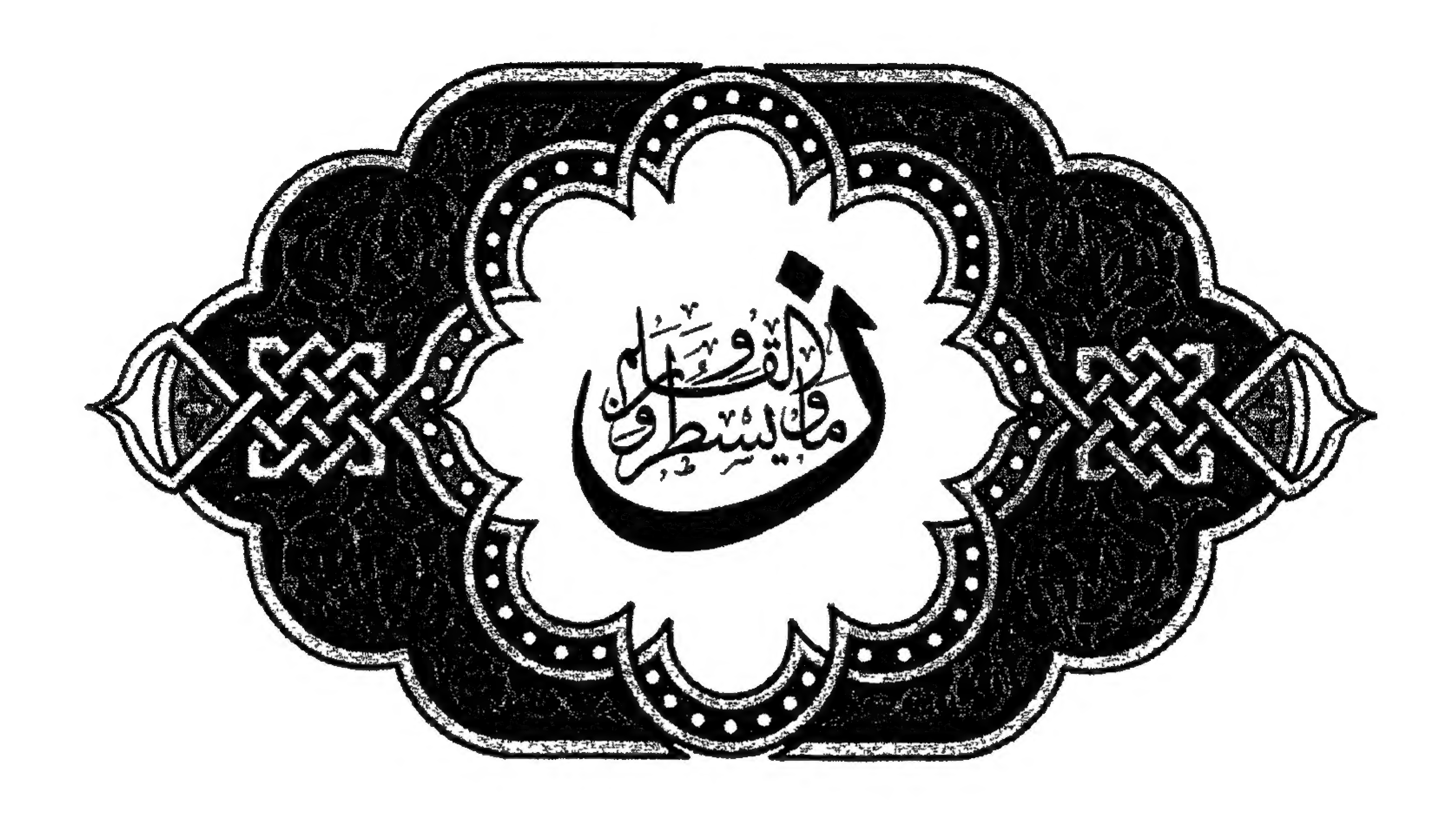
أعد هذا الكتاب بالإعتماد على الخطط
الجديدة لجامعة البلقاء التطبيقية

مكتبة المجتمع العربي
للنشر والتوزيع


مكتبة المجتمع العربي
للنشر والتوزيع



للنشر والتوزيع



علم المواد
الهندسية

علم المواد الهندسية

تأليف

المهندس

محمود أحمد عمري

جامعة البلقاء التطبيقية –كلية الهندسة–

قسم الميكانيك

الطبعة الأولى

2014م–1435هـ



المملكة الأردنية الهاشمية

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (2010/6/1937)

620.104

عمري، محمود احمد

علم المواد الهندسية/محمود أحمد عمري.- عمان: مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع .2010

( ) ص

ر.أ. : 2010/6/1937

الواصفات: /المواد الهندسية/

- يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية أخرى.

الطبعة العربية الأولى

2014م – 1435هـ



عمان – وسط البلد – ش. السلط – مجمع الفحيص التجاري

تلفاكس 4632739 ص.ب. 8244 عمان 11121 الأردن

عمان – ش. الملكة رانيا العبد الله – مقابل كلية الزراعة – مجمع زهدي حصوة التجاري

www: muj-arabi-pub.com

Email: Moj_pub@hotmail.com

ISBN 978-9957-525-59-0 (ردمك)

المحتويات

الوحدة الثانية

التركيب البلوري للمواد

الوحدة الثالثة

السبائك

الوحدة الرابعة

الخواص الميكانيكية للمادة

الوحدة الخامسة

الخواص الكهربائية للمواد الصلبة البلورية

الوحدة السادسة

الخواص المغناطيسية

Magnetic Properties

الوحدة السابعة

الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية

Mechanical Properties of Materials

مقدمة الكتاب

يمكن القول بأن خواص المواد هي المقاييس المحددة التي تصف جودة المواد، وتعتبر اللغة التي يوضح بها المصمم احتياجاته للمادة التي ستقاوم الأحمال والكسر والتفتت والتفاعلات الكيميائية والقوى الأخرى التي سيتعرض لها ..وتفيد الخواص أيضاً في اعتبارها أساس لمقارنة انتظام العينات المختلفة للمادة الواحدة.

ويلاحظ أنه لا توجد قطعتان من مادة واحدة لهما نفس الخواص تماماً بمنتهى الدقة، ويرجع ذلك إلى عوامل كثيرة تتعرض لها المادة أثناء الصناعة أو نتيجة لعمليات التشكيل أو إلى التغييرات التي تحدث للمادة بعد الصناعة أو إلى عوامل الزمن أو إلى التغيير في الحرارة أو الرطوبة أو إلى عوامل أخرى .وقد تختلف الخواص من نقطة إلى أخرى في نفس القطعة نتيجة عدم الانتظام في المادة نفسها إذ ان المادة التي تظهر بأنها متجانسة تماماً هي في الحقيقة مكونة من مجموعة من البلورات التي لها خواص متنوعة في مختلف الاتجاهات ...ولذلك فإن الاستخدام الصحيح للمادة يتطلب من المهندس معرفة الحدود التي ينتظر أن يتغير فيها المتوسط الإحصائي للخواص أثناء مدة عمل المنشأة، كما يتطلب أيضاً من المهندس التحكم في هذه التغيرات.

بسم الله الرحمن الرحيم

تم بحمد الله ورعايته إعداد هذا الكتاب وفقاً لخطة جامعة البلقاء التطبيقية لمادة علم المواد الهندسية لطلبة الشهادة الجامعية المتوسطة .راجياً أن أكون قد وفقت في تقديم المادة المعروضة فيه بالصورة والحجم المناسبين بما يخدم الطلبة ويضع بين أيديهم كتاباً ميسراً تم جمعه وإعداده من مراجع عدة، ليكون مرجعاً مبدئياً لخطة المادة الدراسية .والمكتبات زاخرة لمن أراد المزيد.

م. محمود العمري

الوحدة الأولى

علم المواد الهندسية

1-1 أهمية دراسة المواد الهندسية:

من المعروف أن المواد هي التي تكون الكيان الرئيسي للأعمال الهندسية المختلفة من مبان ومكنات...الخ ولذلك فالمهندس مع اختلاف تخصصه واختلاف العمل الذي يقوم به لا بد من تعامله مع المواد في جميع خطوات عمله لإنشاء العمل الهندسي والمحافظة عليه لكي يؤدي دوره كمهندس بالقدرة المرجوة منه . فمهندس التعدين يقوم باستخلاص خامات المواد من مصادرها الأولية وتركيزها لتستخدم على نطاق صناعي اقتصادي ..ومهندس التصميم المدني -أو المعماري أو الميكانيكي أو الكهربائي أو الكيميائي - يقوم بتصميم المنشأة أو المكنة من مادة أو مواد معينة لتتحمل الأحمال والظروف التي يتطلبها العمل الجاري القيام به مراعياً في ذلك الكفاءة بأقل تكاليف ممكنة... أما المهندس القائم بالتنفيذ أو مهندس التصنيع فيقوم بعمل المنشأ أو المكنة من المواد المختلفة ويلاحظ أن يجري هذا العمل تحت ظروف وبطرق ملائمة ليتسنى لهذا العمل الخواص والمقاومة العالية .. أما مهندس التشغيل فيقوم بتشغيل الأجهزة والمكنات المصنعة من معادن مختلفة وذلك بطريقة يراعى فيها قيام هذه المواد بعملها دون إجهاد شديد أو تعر يضها أثناء التشغيل لعوامل تقلل من كفاءتها أو تؤثر على مدة حياة الأجهزة والمكنات.

أما مهندس الصيانة سواء للمنشآت أو المكنات فيقوم باستخدام مواد لصيانة المواد الأخرى التي صنعت منها هذه المنشآت والمكنات، وكذلك إصلاح الشروخ أو الانحناءات أو الكسور التي تحدث في الأعمال الهندسية باستخدام مواد متنوعة..

كما يقول مهندس التفتيش والاختبارات باختبار المواد لبيان خواصها ومدى صلاحيتها قبل استعمالها للأعمال الهندسية وأثناء التنفيذ، كذلك بيان

مدى كفاءة العمل الهندسي بعد تمامه .ومدى مطابقته ومواده للشروط المطلوبة، أما مهندس المبيعات فيقوم بتسويق منتجات المصانع من المواد المختلفة والمكنات وكذلك المنشآت بطريقة صحيحة وعلى أساس علمي يبين للمشتري مدى كفاءتها وفائدتها ورخص مادتها عن مثيلاتها من عمل آخر.

مما تقدم نرى أن عمل المهندس له صلة رئيسية مباشرة مع المواد حيث يقوم المهندس بمسؤولية تحويل المواد الخام إلى خزانات وسدود ومبان قد ترتفع لتكون ناطحات سحاب ..كذلك والمصانع والسيارات والطائرات النفاثة والصواريخ ..الخ، لذلك فإن قيام المهندس بأداء عمله بنجاح وكفاية يتطلب منه معرفة تامة ودراية صحيحة بالمواد وخواصها المختلفة ومدى مقاومتها لأنواع التحميل التي ستتعرض لها في المنشأة الهندسي،كذلك مدى مقاومتها للعوامل المعرضة لها مع الزمن، والتي تتسبب في تلفها أو نقص مقدرتها من حرارة أو عوامل جوية أو ظروف تشغيل مختلفة .وهذه المعرفة وتلك الدراية تتطلب دراسة القوانين والنظريات التي تتحكم في اختلاف خواص وعمل المواد تحت تأثير العوامل المتنوعة ودراسة المواد نظرياً وعملياً بالاستعانة بالبيانات والمعلومات الكثيرة التي تجمعت عن ماهية المواد نتيجة للخبرة العملية خلال السنوات الطوال منذ أن استعملت المواد لسد الاحتياجات العمرانية في مختلف الأعمال الهندسية ومنشآتها من بداية التاريخ حتى الآن ..كذلك تتطلب متابعة النشاط العلمي والبحوث التي تجري على المواد بالإضافة إلى إجراء البحوث للتواصل إلى حلول للمسائل أو المشاكل التي تقابل المهندس أثناء استخدامه للمواد للأغراض التي يتطلبها التقدم السريع في الحضارة والعمران..

1-2 المواد الهندسية:

يقصد بالمواد الهندسية المواد التي يستخدمها المهندس في أعماله سواء للمنشآت مثل الأحجار والطوب والمواد الاسمنتية والخرسانية والأخشاب والبلاط والقرميد والبلاستيك والمطاط والمعادن والزجاج ومواد تغطية الأرضيات والأسقف

ومواد التثبيت واللحام والمواد العازلة ..وغيرها . كذلك تلك المواد التي يستخدمها في صناعة أجهزته ومكناته مثل الحديد والألمنيوم والنحاس .. الخ ..أو في صيانة منشآته ومكناته مثل الطلاء والبويات والزيوت ..أو المواد التي تلزم لاستخلاص وصناعة مواد المنشآت والمكنات مثل الحجر الجيري لاستخلاص الحديد الخام أو الرمل والزلط في صناعة الخرسانة وكذلك المواد التي تستخدم لتوليد الطاقة مثل الماء والفحم والمواد البترولية ومواد الطاقة الذرية.

أ. أنواع المواد الهندسية:

يمكن تقسيم المواد الهندسية إلى ما يأتي:

1. المواد المعدنية وتنقسم إلى:

- معادن حديدية مثل الصلب والحديد الزهر والحديد المطاوع..
- معادن غير حديدية وهي معادن ثقيلة مثل النحاس والنيكل ومعادن خفيفة مثل الألمنيوم والمغنيسيوم ومعادن طرية مثل الرصاص والصفيح..

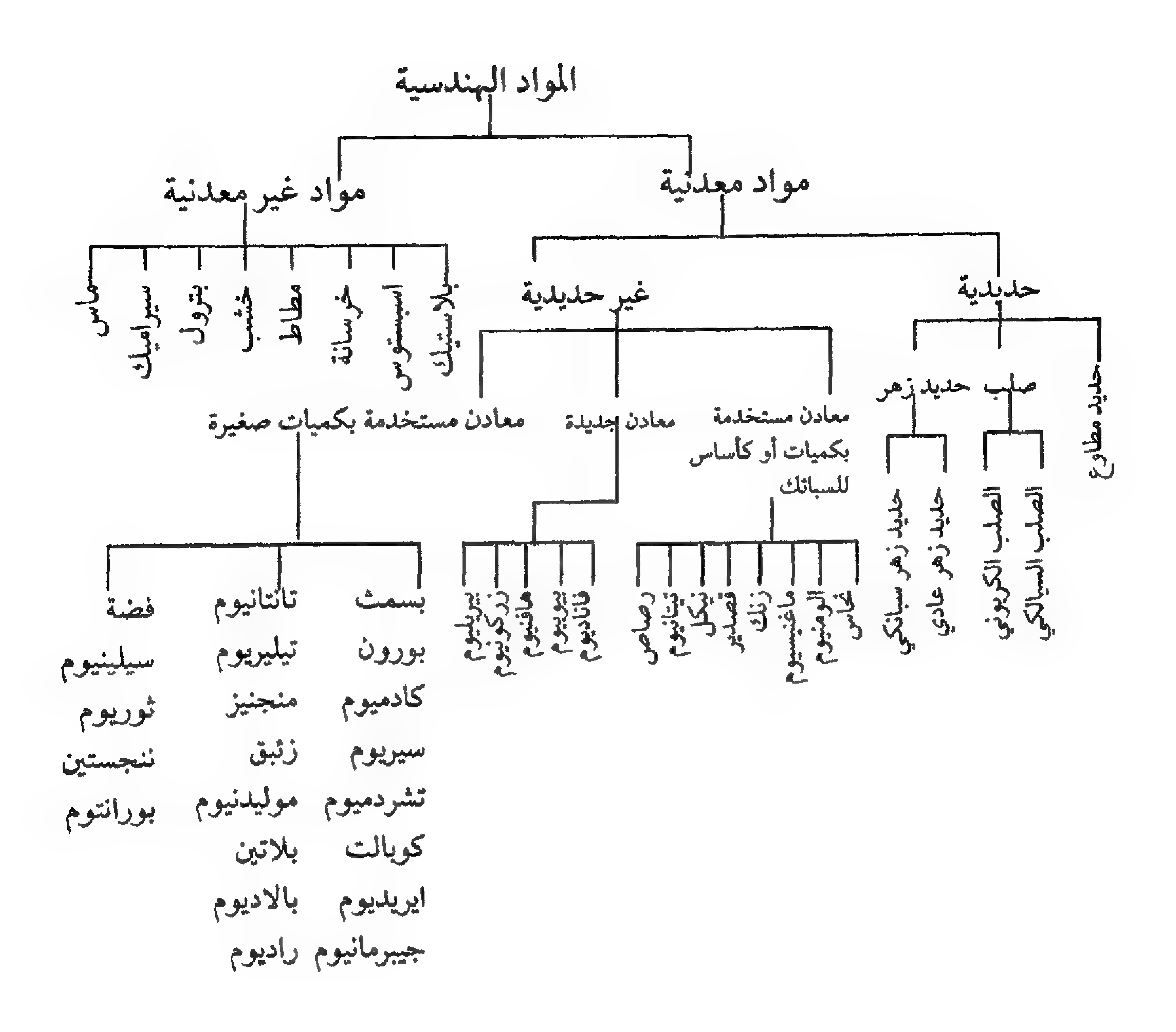
2. المواد غير المعدنية وتنقسم إلى:

- مواد البناء مثل الأحجار والطوب والخرسانة والاسمنت والجبص والجير والأخشاب .. الخ.
- مواد أخرى متنوعة مثل البلاستيك والمطاط والفلين والبويات .. الخ.

3. المواد المولدة للطاقة: مثل الماء والمواد البترولية واليورانيوم .. الخ..

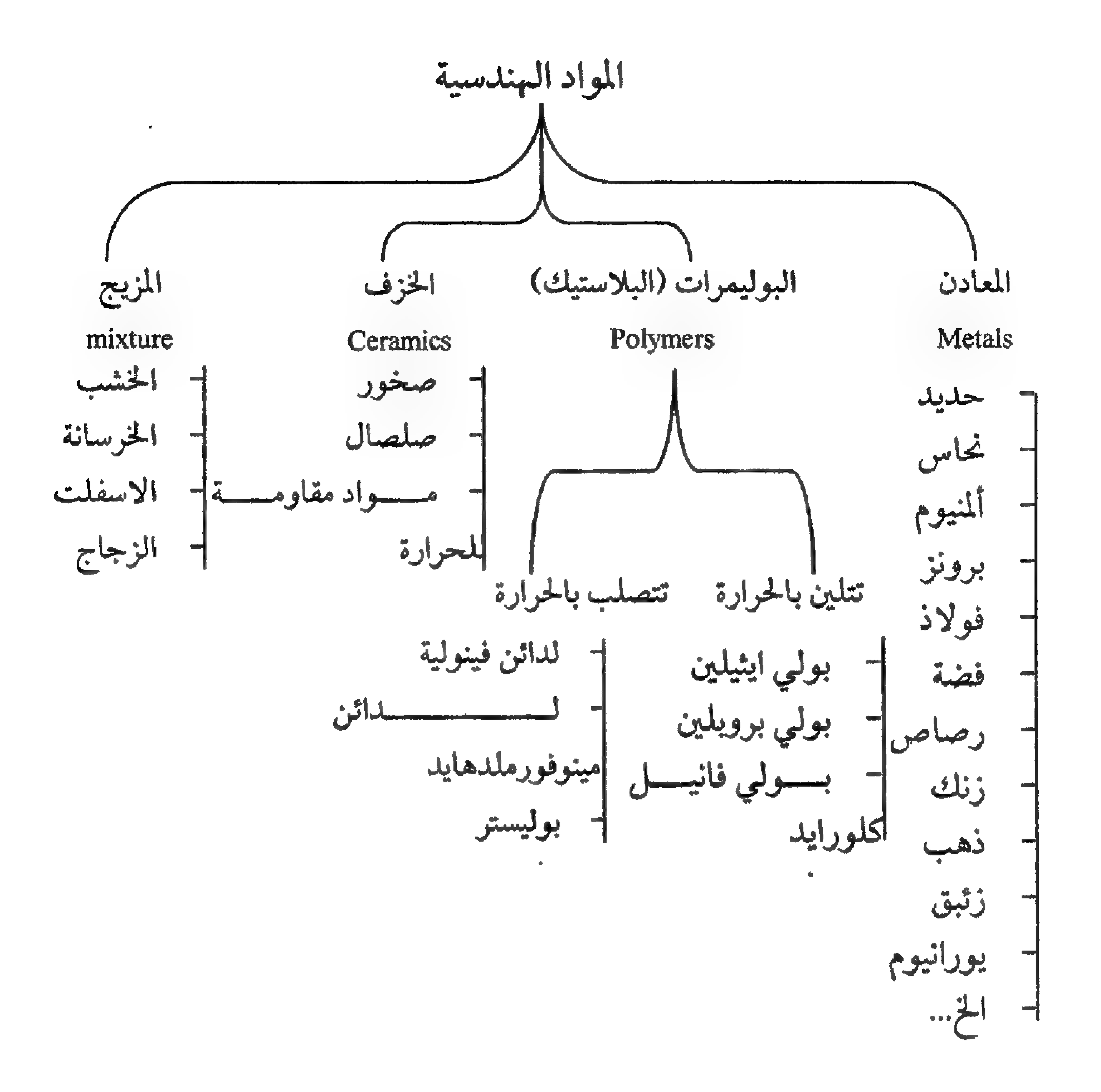
ويبين الشكل (1- 1) تقسيماً للمواد الهندسية.

كما يبين الشكل رقم (1- 2) الكثافة المختلفة لبعض المواد الهندسية.



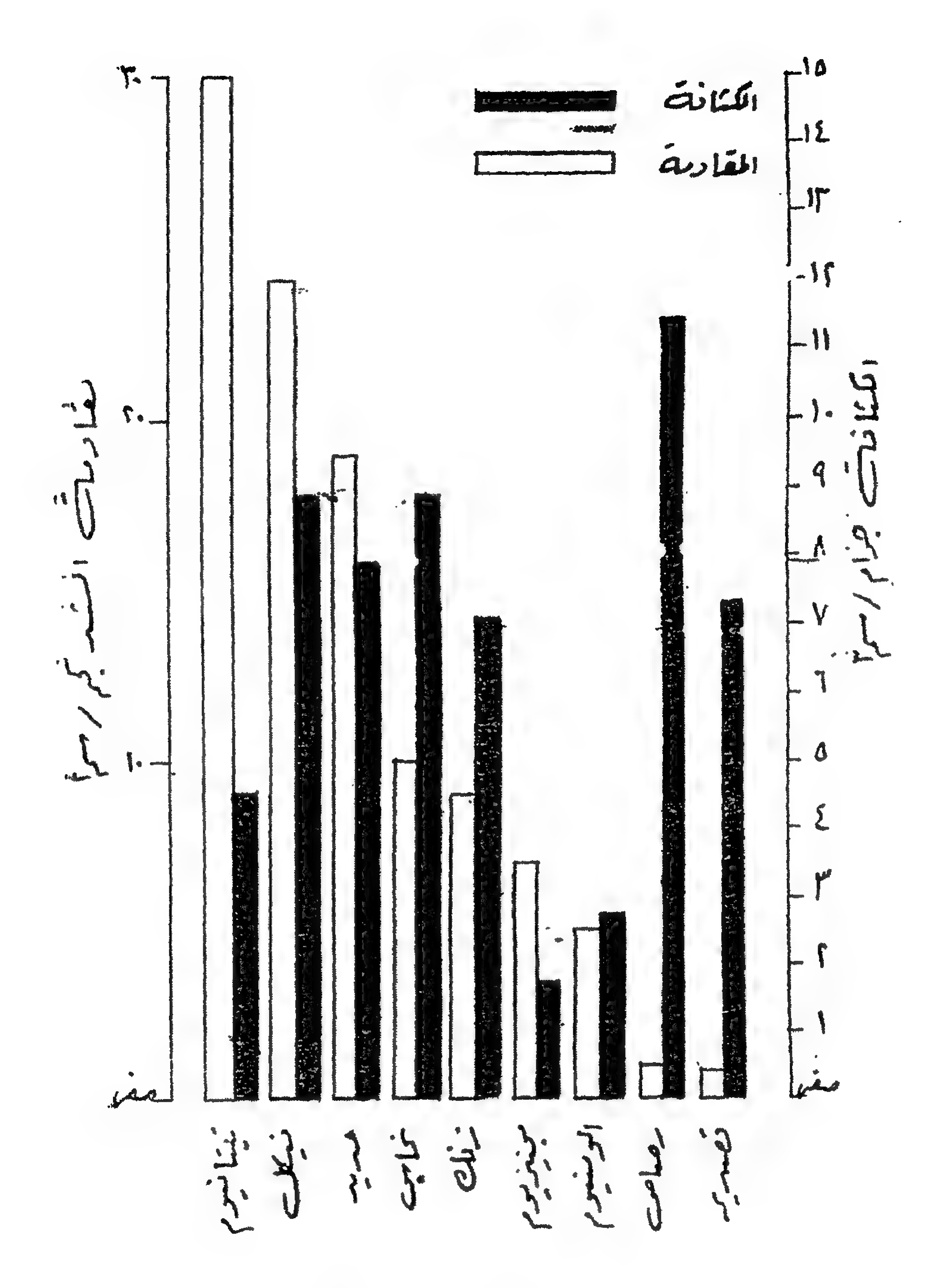
شكل رقم (1- 1) (تقسيم المواد الهندسية)

التصنيف الثاني: (يعتمد هذا التصنيف)

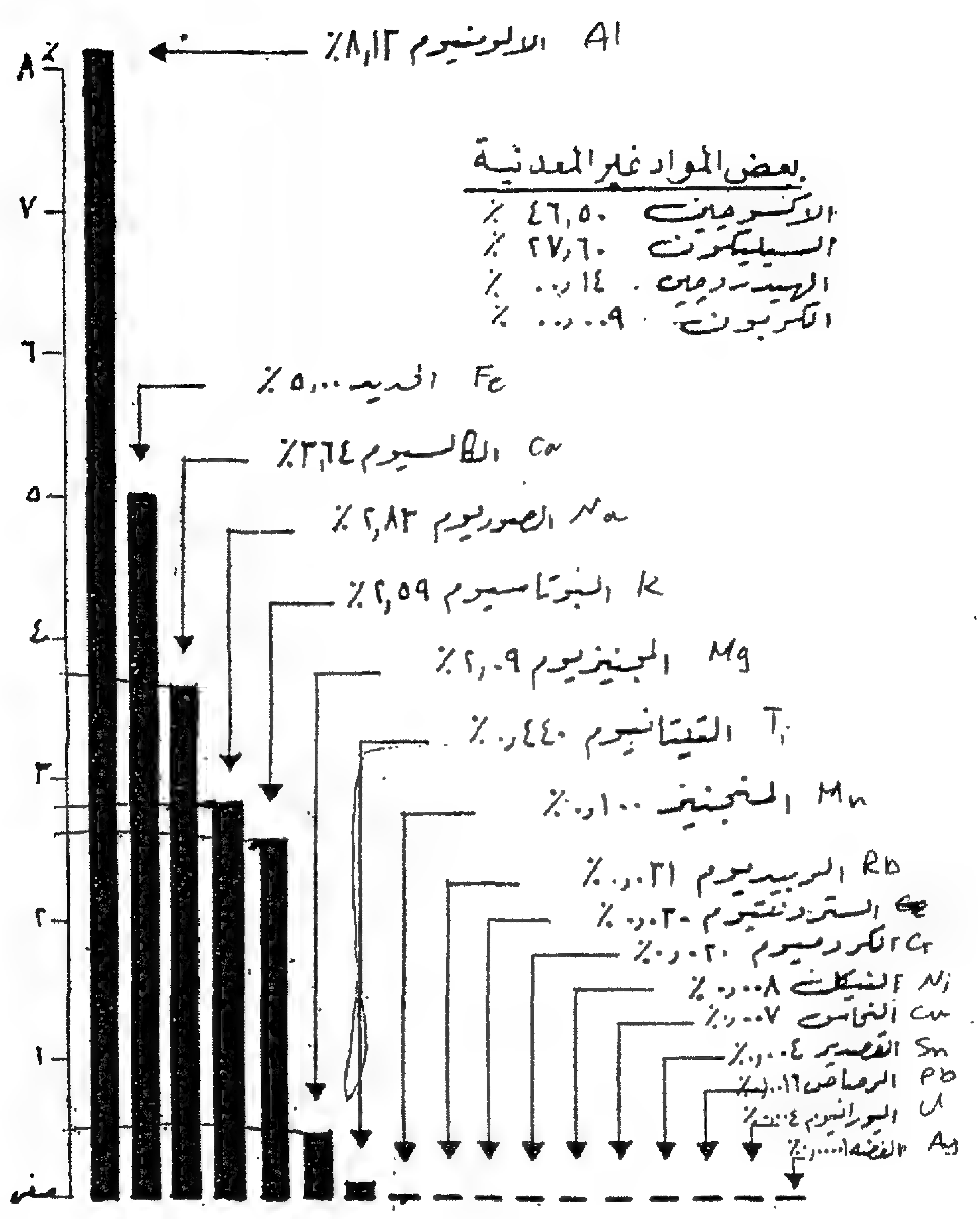


ملاحظة :

سوف نعتمد التصنيف الثاني) أعلاه (وذلك حسب الخطة الدراسية الموضوع من قبل الكلية.



شكل رقم (1- 2)
كثافة بعض المواد الهندسية



Al الالومنيوم ٨,١٢٪
بعض المواد غير المعدنية
الاكسوجين ٤٦,٥٠ ٪
السيليكون ٢٧,٦٠ ٪
الهيدروجين ٠,١٤ ٪
الكربون ٠,٠٩ ٪
Fe الحديد ٥,٠٠ ٪
Ca الكالسيوم ٣,٦٤ ٪
Na الصوديوم ٢,٨٣ ٪
K البوتاسيوم ٢,٥٩ ٪
Mg المغنيزيوم ٢,٠٩ ٪
Ti التيتانيوم ٠,٤٤٠ ٪
Mn المنجنيز ٠,١٠٠ ٪
Rb الربيديوم ٠,٠٣١ ٪
السترونشيوم ٠,٠٣٠ ٪
Cr الكروميوم ٠,٠٢٠ ٪
Ni النيكل ٠,٠٠٨ ٪
Cu النحاس ٠,٠٠٧ ٪
Sn القصدير ٠,٠٠٤ ٪
Pb الرصاص
U اليورانيوم
Ag الفضة
٨
٧
٦
٥
٤
٣
٢
١
صفر
محتويات القشرة الارضية من المعادن
(نسبة مئوية الوزن)

شكل رقم (1- 3)

ب. مصادر خامات المواد الهندسية:

تستخرج خامات المواد الهندسية من مصادر معدنية مثل خام الحديد (الهيماتيت) والحجر الجيري .. الخ، أو مصادر نباتية مثل الأشجار أو من مصادر حيوانية مثل البترول الخام ...وتعتبر المصادر المعدنية هي المعين الرئيسي للمواد الهندسية ..ويمكن القول باعتبار أن الأرض والماء والهواء هي مصادر خامات المواد الهندسية، كذلك يمكن اعتبار أن متوسط تكوين الأرض والماء والهواء من المواد كما هو مبين في الجداول (1) و (2) و (3) والشكل رقم (1- 3).

جدول رقم (1) عناصر تكوين الأرض

العنصر	الأكسجين	السليكون	الألمنيوم	الحديد	الكالسيوم	الصوديوم
%	46.4	27.7	8.1	5.00	3.6	2.8
العنصر	البوتاسيوم	المغنسيوم	التيتانيوم	الإيدروجين	الفوسفور	الكربون
%	2.6	2.1	0.63	0.14	0.13	0.094
العنصر	المنجنيز	الكبريت	الكروم	النيكل	النحاس	اليورانيوم
%	0.090	0.052	0.035	0.019	0.010	0.008
العنصر	التنجستن	الزنك	الرصاص	الصفيح	الفضة	الزئبق
%	0.005	0.004	0.002	0.0005	0.00004	0.000025

جدول رقم (2) عناصر تكوين ماء المحيطات

العنصر	الأكسجين	الأيدروجين	الكلور	الصوديوم	المغنيسيوم	البروميد
%	85.79	10.67	20.7	1.14	0.14	0.008

جدول رقم (3 (عناصر تكوين الهواء

العنصر	النيتروجين	الأكسجين	الأرجون	النيون
%	73.03	20.99	0.94	0.0012

وليست خامات المواد موزعة توزيعاً متساوياً كما هو مبين بالجداول السابقة ولكن يتركز كل منها في مناطق معينة من الأرض بنسب عالية ..وتعتبر هذه المناطق من الأماكن الاقتصادية مثل المناجم لاستخراج هذه الخامات .. فمثلاً متوسط نسبة معدن الحديد بالأرض حوالي 5 %بينما لا يعتبر المكان الذي يستخرج منه خام الحديد صالحاً للاستعمال اقتصادياً إلا إذا كانت نسبة الحديد فيه حوالي 50.%

ج. اختيار المواد الهندسية:

إن اختيار المواد معناه قياس مدى صلاحية المادة للاستعمال في الأغراض المعينة .وعلى ذلك نجد أن من أهم أغراض اختيار المواد المساعدة على إظهار وتأكيد مدى احتمال المواد تحت ظروف العمل.

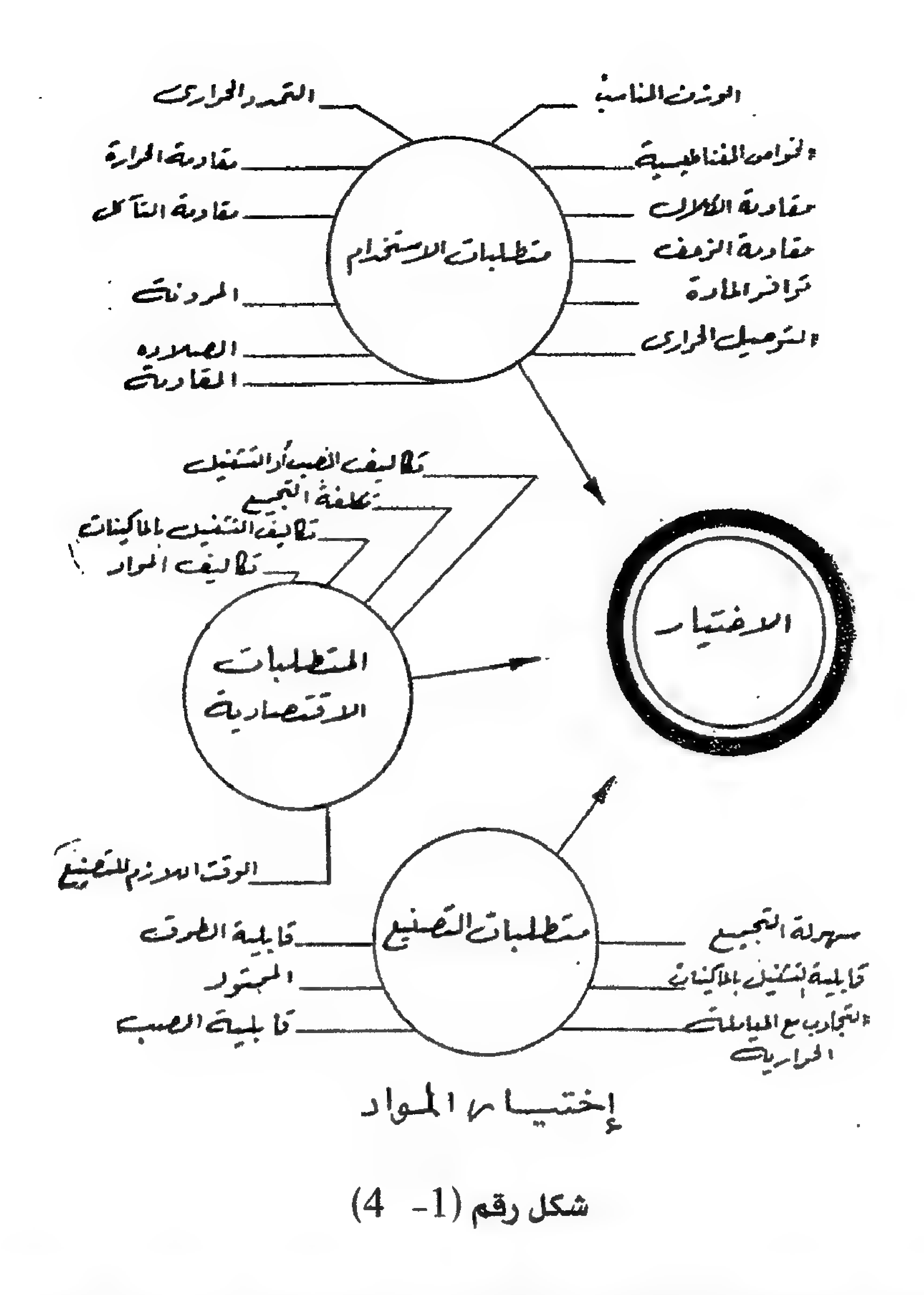
ويجب أن يوضع في الاعتبار أن المادة التي لا تتأثر عند إساءة استعمالها تتمتع بميزات تضارب بها المواد الأخرى .كما أن المادة الثابتة والتصميم الصحيح يؤكدان معاً سلامة المنشأ في حدود الاستعمال المقصود .وهناك مصدران يحصل منهما المصمم على البيانات اللازمة في اختيار المواد وهما:

1. تقارير تبين مدى كفاءة المواد عند الاستعمال الواقعي.
2. نتائج الاختبارات التي أجريت على المواد لبيان خواصها حتى يمكن إعداد مواصفاتها.

ولتحويل التصميم إلى بناء قائم فعلاً يجب على المنشىء أو الصانع أن يختار مجموعه مواد بدرجات يسهل الحصول عليها على أن يستعمل نوع المواد التي كان يقصدها المصمم عند وضع التصميم، وبعد ذلك تجري الاختبارات المطلوبة لتحديد نوع المواد اللازمة.

وفيما يلي مختصر لما يؤخذ في الاعتبار عند اختيار المواد من حيث مشاكل التصميم والتصنيع:

1. أنواع المواد التي يمكن الحصول عليها
2. خواص المواد المختلفة
3. الاستعمالات المطلوبة من المواد.
4. التوفير النسبي في المواد والأشكال المختلة لتلك المواد المعينة.
5. طرق تحضير أو صناعة المواد المختلفة أو المنتجات وتأثير هذه العملية على خواصها.
6. طرق تحضير المواصفات ومدى ضمانها لتماثل الإنتاج.
7. طرق الاختيار والفحص ومدى دلالتها على تقرير وقياس الخاصية المطلوبة .ويبين الشكل رقم (1- 4) المتطلبات المختلفة التي تتحكم في اختيار المواد.



شكل رقم (1- 4)

كما يبين الجدول رقم (4) أمثلة عن العمل الهندسي والخاصية المطلوبة في المادة اللازمة حتى يمكن اختيار المادة المناسبة على هذا الأساس.

جدول رقم (4)

العمل الهندسي المناسب لكل خاصية هندسية

الخاصية	مثال للعمل الهندسي الذي يتطلب هذه الخاصية
المقاومة للكسر	السلاسل
المقاومة للأحمال المتكررة	قضيب المحور الدوار
القدرة على امتصاص الطاقة	الزنبركات
المقاومة للتآكل والبري	قواعد الارتكاز
المقاومة للصدأ	أجزاء المكنات النفاثة
خفة الوزن	أجزاء الطائرات
القدرة على التوصل الحراري	أنابيب المراجل
المقاومة للضغط	الأعمدة الخرسانية
المقاومة للإشعاع	الحوائط المصنوعة من الرصاص

1-3 المعادن

أ. الحديد المطاوع Iron (Fe):

وهو أكثر المعادن استخداماً في العالم ويكوّن ما نسبته 5٪ من القشرة الأرضية، ويستخدم في مختلف الأعمال الهندسية والإنشائية بأشكال مختلفة (زوايا، قضبان، مواسير، قضبان مفرغة)، وأشكال أخرى مختلفة بما يتلائم مع المنشآت المعمارية والصناعية، سهل التشكيل، ولين قابل للطرق ولكن سيئته الأساسية ميله الشديد للصدأ والتأثر بعوامل الطبيعة .وللحفاظ عليه يفضل طلاءه بشكل عام بأنواع معينة من الدهانات منعاً للصدأ.

خامات الحديد المفضلة هي تلك التي لا تحتوي على الكبريت ويستخرج الحديد من مناجم الخامات الطبيعية الموجودة في القشرة الأرضية، ومن أهم

خامات ا لحديد:

1. خامات أكاسيد الحديد.
2. خام الحديد المغناطيسي الأسود اللون.
3. الهيماتيت الأحمر أو بني اللون.
4. خامات الكربونات الحديدية (ذات اللون الرمادي).

كثافة الحديد $7.83\ gr/cm^3$ ودرجة حرارة انصهاره 1539°C.

ب. الفولاذ (Steel) :

ويسمى كذلك باسم(الحديد الصلب) ويتكون أساساً من الحديد المطاوع) المذكور في البند أ (مضافاً إليه الكربون بنسبة أقل من 2٪ وكذلك الكبريت والسيليكون والمنغنيز بكميات أقل وكلما كانت نسبة الكربون أكبر في الفولاذ كلما زادت صلادته وقلت قابليته للسحب .ويستخدم الفولاذ بشكل عام في المنشآت المعمارية والجسور والبويلرات (المراجل) والحاويات وفي أجزاء الشاحنات والسيارات والهياكل المعدنية الكبيرة، وكذلك في صناعة العدد والأدوات للمهن الميكانيكية والفنية والنجارة والحدادة، ويتميز بشكل عام بالمتانة والصلابة ومقاومة الصدمات والاهتراء والصدأ.

وأنواعه الرئيسية هي:

1. منخفض الكربون 0.25%كربون ، 1%منغننيز ، 0.5%نيكل
2. متوسط الكربون 0.85 %كربون، 0.6%منغننيز ، 2%نيكل،
3. ستينلس 0.50 % كربون، 2%منغننيز ، 10%نيكل، 18%كروم

ويستخدمم الستينلس ستيل في صناعة الأدوات والعدد الطبية الجراحية كالسكاكين والمقصات وفي صناعة الشفرات ومواسير التعقيم.

ويمكن بيان تأثير المعادن على الحديد الفولاذ حسب الجدول التالي:

المعدن المضاف إلى الفولاذ	تأثيره على الخواص
1. الكبريت	- يزيد من تقصفه وهشاشته
2. الفوسفور	- غير محبذ إضافته للفولاذ
3. السيليكون	- يزيد من تقصف الفولاذ
4. المنجنيز	- نسبته القليلة تزيد من متانة الفولاذ
5. النيكل	- يعطي الفولاذ خاصية عدم الصدأ ويزيد من صلادته
6. الكروم	- يزيد من صلادة الفولاذ ويقلل من تعرضه للصدأ.
7. التنجستون(والموليبديوم)	- يزيد من صلادة الفولاذ
8. الفيناديوم	- يساعد على تخلص الفولاذ من الغازات المحتبسة به ويزيد من متانته وقابليته للطرق.

ج. حديد السكب (الزهر) (Cast Iron):

وهو سبيكة من الحديد المطاوع مضافاً إليه الكربون بشكل رئيسي (بنسبة تزيد على 2٪) ومعادن أخرى مثل الكبريت، الفوسفور، المنغنيز، السيليكون، يستخدم بشكل عام لصناعة أجسام المحركات وأجسام الماكنات والآلات والمبادلات الحرارية.

يُضاف الكربون إلى الحديد المطاوع مع المعادن الأخرى(ليس بالضرورة كلها) وتصهر مع بعضها البعض ليتم سكبها حسب الطلب .تساعد المعادن المضافة في زيادة مقاومة الحديد الزهر للصدأ وتزيد من متانته وصلادته ومقاومته للتآكل ولكنها بالمقابل تجعله أكثر قابلية للكسر(يصبح قصفياً)

ويحدث به شروخ وكسور إذا تعرض للصدمات القوية.

أنواع الحديد الزهر هي:

1. حديد الزهر الرمادي:(Grey Cast Iron)

تصل نسبة الكربون فيه إلى 3.5٪، ويحضر الحديد الزهر الرمادي بصهر الحديد الخردة .يستخدم بصورة رئيسية في صناعة الأجزاء التي لا تتعرض لقوى شد عالية مثل الأنابيب الكبيرة وأجسام المضخات وهياكل الماكنات .وهو سهل التحضير، رخيص الثمن وسهل التشغيل. مقاومته للبري الناتج عن الانزلاق ممتازة.

2. الحديد الزهر القابل للطرق:

يختلف بتركيبته عن حديد الزهر الرمادي عن طريق إضافة المغنيسيوم والنيكل، وله العديد من الخواص التي تشبه خواص الفولاذ بالإضافة إلى حسنة أخرى هي أنه أقل كلفة من الفولاذ في الإنتاج .يستخدم لإنتاج الأجزاء التي تتطلب مسامية أقل وكذلك لإنتاج المشغولات التي تتطلب درجة لا بأس بها من القساوة .قابلية تشغيله جيدة كالزهر الرمادي ,وسطحه أكثر استعداداً للصقل الميكانيكي.

3. حديد الزهر المطاوع:

وله قابلية الطرق كالحديد المطاوع، وهو مادة رخيصة ذات خواص جيدة ويستخدم لأغراض عديدة، مثل أجسام صناديق التروس الخاصة بنظام التوجيه في السيارات، ودواسات الفرامل وماكنات الغسيل .ويلاحظ أن قابليته للطرق ونقطة الخضوع له تقارب تلك للفولاذ اللين.

د. الألمنيوم (Aluminum) ورمزه(AL) :

كثافته $2.7\ g/cm^3$ ودرجة انصهاره $660°C$ ويكون نسبة 8٪ من القشرة الأرضية وتسمى خاماته باسم بوكسايت .والألمنيوم يتأكسد بسهولة في درجات حرارة الجو العادية وتعطيه هذه الصفة فائدة كبيرة جداً إذ أن طبقة الأكسيد التي تتكون على سطح الألمنيوم تحميه حماية جيدة من العوامل الخارجية(كالحرارة والبرودة وأشعة الشمس والرطوبة ... الخ) كما أن هذه الطبقة الاكسيدية تمنع تآكل الألمنيوم وتقاوم الصدأ وتعتبر هذه أهم مميزاته إضافة إلى خفة وزنه.

مميزات الألمنيوم هي:

1. خفة وزنه.
2. نقاوه(قد تصل نقاوته إلى 99.99٪).
3. مقاومة طبقة أكسيده للظروف الجوية.
4. مقاومته للصدأ.
5. موصل جيد للكهرباء ($\frac{2}{3}$ موصلية النحاس).
6. موصل جيد للحرارة.
7. غير قابل للمغنطة.
8. لا يكون مواد سامة.
9. قابل للتشكيل بإبعاد هندسية دقيقة(كالشبابيك والأبواب).

سيئاته هي:

1. قليل المتانة
2. قليل الصلادة ($\frac{1}{4}$ صلادة الحديد).
3. صعوبة لحامه.
4. قابليته للتقصف.

استخداماته:

يستخدم في صناعة الأبواب والشابيك، والأدوات المنزلية وأدوات وأواني الطهي، وأجسام الطائرات ،وأجزاء التكييف والتبريد، وفي صناعة الأسلاك الكهربائية.

سبائك الألمنيوم هي كما يلي:

ألمنيوم + مغنيسيوم ، ألمنيوم + سيليكون ، ألمنيوم + منغنيز ، والألمنيوم + نحاس أو حديد ، وأحياناً يضاف الكروم والتيتانيوم.

ه. النحاس (Copper) ورمزه(Cu) :

كثافته $8.9\ g/cm^3$ ودرجة انصهاره $(1082.7)°C$، وتعتبر مناجم النحاس بشكل عام قليلة في العالم (0.01% من القشرة الأرضية) واهم شيء في مناجم النحاس أن تكون الشوائب قليلة حيث أن قيمة النحاس تقاس حسب نقاوته .ويمكن الحصول على نحاس نقي جداً باستخدام طريقة التأين الكهربائي ولون النحاس النقي أحمر.

مميزات النحاس:

1. موصل جيد جداً للكهرباء (5 أضعاف موصلية الحديد).
2. معدن طري قابل للالتواء والتشكيل.
3. موصل جيد جداً للحرارة حيث أن حرارته النوعية ضعفي حرارة الحديد النوعية.
4. سبائكه تدخل في صناعات هامة جداً.

وسيئة النحاس الرئيسية هو تكون أكسيد النحاس(الزرنيخ) السام ولذلك لم يعد يستخدم في صناعة أواني الطبخ.

استخدامات النحاس هي:

1. في صناعة الأسلاك الكهربائية بشكل كبير جداً.
2. في صناعة الأنابيب وأجسام البويلرات (المراجل).
3. في صناعة أسلاك اللحام وكاويات اللحام.
4. في صناعة القوارب وأجزائها.
5. في صناعة التماثيل البرونزية والحمالات الثابتة للمحاور.

سبائك النحاس:

1. النحاس الأصفر(Brass) :

وهو نحاس أحمر + زنك بنسبة تتراوح بين 5٪ إلى 40٪ .ويعطيه الزنك خاصية الليونة العالية جداً اللازمة لصناعة الأسلاك الدقيقة .كما يستخدم النحاس الأصفر في صناعة أجزاء القوارب والمضخات المستخدمة في مياه البحر . ومع أن إضافة الزنك تعتبر الإضافة الرئيسية في النحاس الأصفر ولكن يضاف إليه أيضاً الألمنيوم، الحديد، النيكل، المنغنيز .علماً بأن إضافة نسبة كبيرة من النيكل إلي (قد تصل إلى 30٪) تؤدي إلى صناعة ما يسمى بالفضة الألمانية أو النيكلية والمستخدمة في صناعة التلفزيون والأجهزة اللاسلكية.

2. البرونز (Bronze) :

وهو نحاس أحمر + قصدير + رصاص .وقد تصل نسبة القصدير إلى 10٪ . أما الرصاص فقد تصل نسبته إلى 30٪ ويتميز البرونز بأنه:

1. معدن صلب.
2. مقاوم للاهتراء.
3. سطحه صلب.
4. قابل للسكب والتشكيل بأشكال معقدة كالتماثيل الفنية مثلاً.

ويستخدم البرونز في صناعة العملة والمدافع والتماثيل وحمالات المحاور ومواسير مكثفات السفن.

1-4 الخلائط(Mixtures) :

أ. الخزفيات(Ceramics) :

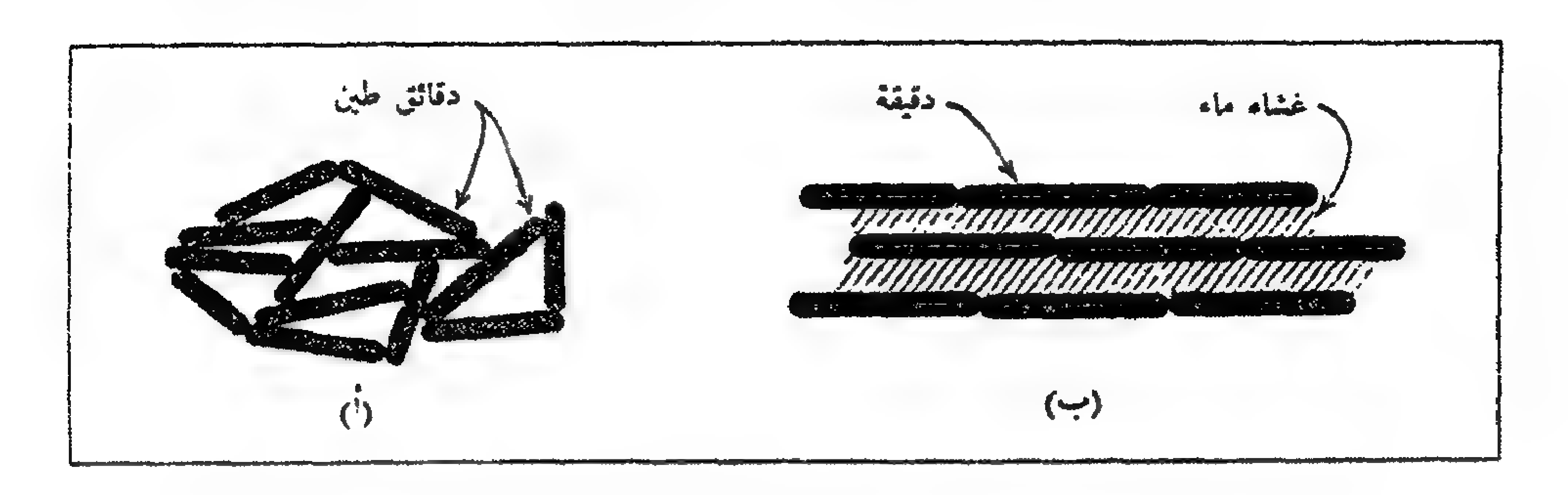
الصناعات الخزفية من الصناعات القديمة جداً، ويصنع الخزف من أنواع معينة من الطين الصلصالي الذي يتكون أساساً من مواد غير عضوية لا فلزية يتم تصنيعها عند درجات حرارة عالية .وهي تشمل مجموعات واسعة من السيليكات والأكاسيد الفلزية (أكسيد الألمنيوم، أكسيد الكالسيوم، أكسيد الحديد، أكسيد السيليكون، الصوديوم والبوتاسيوم). علاوة على ذلك تعتبر العناصر والمجموعات التالية من المواد الخزفية :الكربون، البورون، السيليكون وبعض الكبريتيدات و السيليكات .وتختلف صناعة الخزفيات الآن عما كانت عليه قبل عقود من الزمان فقد أصبحت تكنولوجيا متقدمة.

يمكن جمع الخزفيات في ثلاثة أقسام رئيسية:

النواتج الطينية ، المواد الحرارية المقاومة للحرارة، والمواد الزجاجية، وهذا التقسيم مبني على الخصائص العامة المميزة للخزفيات .فالنواتج الطينية(الفخاريات)تشمل مواد هندسية مثل الطوب، القرميد، البورسلين، الخزف الحجري والعديد من المصنوعات الكيماوية.

تخلط المكونات الصلصالية مع الماء لتكوين الطينة التي يجب أن تكون ذات لدونة مناسبة بحيث تحتفظ بشكلها الأصلي عند التشكيل فزيادة كمية الماء تقلل من إمكانيات التشكيل، وتخفيض كمية الماء تؤدي إلى التشقق أثناء التجفيف . بشكل عام تعتمد كمية الماء على شكل وحجم حبيبات الطين .حيث يساعد الماء في جعل حبيبات الطين متوازية كما في الشكل (5- 1) ويكون غشاءاً حافظاً بين

خطوط الحبيبات ويبقيها متماسكة .يعمل التجفيف بعد ذلك على إزالة الماء من الطين، ويجب أن يكون التجفيف بطيئاً كي لا يؤدي ذلك إلى تشقق المشغولات.



شكل (5- 1)

لدونة الطين (أ) ترتيب عشوائي لدقائق الطين الموجودة في الطين الجاف(ب) توجيه متوازي لدقائق من الطين محاطة بغشاء من الماء تحت تأثير إجهاد قصي.

بعد التجفيف يتم حرق المشغولات في أفران خاصة عند درجة حرارة تتراوح بين 900°C إلى 1400°C.

فمثلاً يتم حرق الطوب الحراري عند 900°C، أما البورسلان فيتم حرقه عند 1400°C، ويستخدم البورسلان كعازل للكهرباء في الضغط العالي، وكذلك صناعة أواني حفظ المواد الكيماوية والأحماض.

أما المواد الحرارية فتتميز بمقاومتها لدرجات الحرارة العالية، لذا فهي تستخدم في هذه المجالات مثل التوربينات الغازية، المحركات النفاثة، الصواريخ، والمفاعلات الذرية وغيرها.

وهي تتكون من أكاسيد ذات درجة انصهار عالية مثل أكسيد السيليكون، أكسيد الألمنيوم، أكسيد المغنيسيوم، أكسيد الكالسيوم وأكسيد الزركونيوم.

ب. الزجاج (Glass) :

يمكن تعريف الزجاج بأنه مصهوو غير عضوي تم تبريده إلى درجة الجساءة دون حدوث تبلور .ومع أن السيليكا مادة جيدة لتشكيل الزجاج إلا أن درجة حرارة انصهارها عالية جداً بحيث يصعب صهرها بكلفة معقولة .لذا تضاف إليها بعض الأكاسيد الفلزية التي تعمل على خفض درجة حرارة الانصهار واللزوجة مما يجعل عملية تصنيع الأدوات الزجاجية أسهل .فمثلاً تؤدي إضافة حوالي 25٪ من أكسيد الصوديوم إلى تكوين سيليكات الصوديوم ($Na_20.2SiO_2$) التي تكون بدورها السيليكا مزيجاً سهل الصهر، ولكنه يُظهر ميلاً نحو عدم الشفافية وقابل للذوبان في الماء لذا لا يُستخدم كثيراً.

يمكن تصنيف الزجاج التجاري إلى :زجاج عادي، زجاج رصاصي، زجاج سيليكات البورون، زجاج سيليكات الألمنيوم والزجاج الغني بالسيليكا .قد تتواجد بعض المركبات الحديدية في الزجاج ويمكن إخفاء تأثيرها بإضافة عوامل ملونة . ويتم إنتاج هذا النوع من الزجاج العادي بكميات هائلة لأنه رخيص التكاليف و مقاوم للماء ويحتفظ بالشفافية، ويستخدم بشكل واسع في المنازل وصنع اللمبات الكهربائية والزجاجات، والاستخدامات التي لا تتطلب درجات حرارة عالية.

يتمتع الزجاج بمقاومة عالية للتآكل(التحات)، ولكنه يتآكل بفعل حامض الهيدروفلوريك وحامض الفوسفوريك المركز والمحاليل القلوية المركزة.

يتم صهر الزجاج في أفران خاصة بحيث ينساب الزجاج المصهور داخل الفرن فيتنقى من الشوائب ويتم تشكيله بعدة طرق مثل الكبس، والنفخ والسحب والدرفلة حيث يستخدم الكبس والنفخ لصناعة الأواني والأشكال الأخرى بينما يستخدم السحب لصناعة الأنابيب الزجاجية والدرفلة لصناعة الألواح الزجاجية وذلك بتمريرها بين سطحين اسطوانيين دوارين (rolls) تبردان بالماء.

ينتج عن عمليات التشكيل إجهادات داخلية يجب التخلص منها وذلك

بتمريره داخل منطقة ساخنة ومحصورة بحيث يبرد تدريجياً إلى أن يصل إلى درجة حرارة قريبة من درجة حرارة العزقة .ومن الصفات المهمة الواجب توفرها في مصهور الزجاج لكي يتم تصنيعه بشكل صحيح صفة اللدونة.

ويسمى الزجاج - زجاجاً خزفياً - إذا كان من النوع المتبلور أو عديم الشفافية.

ج. الاسمنت غير العضوي (In Orgamic Cement):

الاسمنت غير العضوي ومشتقاته هي مواد تُظهر خواص مميزة من التصلب والنقية عند خلطها بالماء على شكل عجينة .يمتلك الاسمنت القدرة على وصل الكتل الصلبة الجامدة إلى تراكيب مترابطة .ويمكن تقسيم الاسمنت إلى نوعين حسب طريقة التصلب :هيدروليكي مثل الاسمنت البورتلندي العادي الذي يتصلب بوجود الماء .واسمنت لا هيدروليكي مثل الجبص (فيتميز بتصلبه في الهواء ولا يمكن استخدامه مع وجود الماء).

تركيب الاسمنت البورتلندي(Portland Cement) :

يعتبر الاسمنت البورتلندي من أهم أنواع الاسمنت الهيدروليكي،ويستخدم بشكل واسع في الإنشاءات المختلفة.

ويتم تحضيره بواسطة حرق مزيج متآلف يتركب بصورة رئيسية من مواد كلسية أو طينية أو من مركبات أخرى مثل السيليكا، الألومينا ومواد المحامل - أكسيد الحديد، يتم حرق المواد على درجة حرارة حوالي 1400°C ومن ثم تطحن المادة المحروقة إلى مسحوق ناعم وتضاف كمية قليلة من الجص إلى المسحوق قبل طحنه .ويتركب الاسمنت البورتلندي من: أكسيد الكالسيوم، السيليكا، الألومينا، أكاسيد حديدية، أكسيد المغنيسيوم، وثالث أكسيد الكبريت .وبعد الحرق تكون المكونات كما يلي:

سيليكات الكالسيوم الثلاثية، سيليكيلات الكالسيوم الثنائية، الومينات الكالسيوم الثلاثية ومركبات أمينوفيريت كالسيوم رباعي .يعزى التصلب السريع للاسمت لوجود سليكيات الكالسيوم الثلاثية وهي أسرع المكونات تصلباً.

أما سيليكات الكالسيوم الثنائية فإنها تأخذ وقتاً أطول للتصلب وبطريقة أكثر تعقيداً.

يعتبر وجود الألومينا وأكاسيد الحديد في المزيج الخام أمراً ضرورياً لأنها تؤدي وظيفة عوامل الصهر المساعدة حيث تخفض درجة حرارة الانصهار، مما يسهل إعادة تبلور سيليكات الكالسيوم الثلاثية.

وهناك خمسة أنواع رئيسية من الاسمنت البورتلندي النوع الأول الذي يستخدم في صناعة الخرسانة، النوع الثاني والرابع والخامس تتميز بانخفاض نسبة سيليكات الكالسيوم الثلاثية والومينات الكالسيوم الثلاثية فيها، ويعلل ذلك انبعاث حراري منخفض أو متوسط منها عند خلطها مع الماء.

النوع الرابع يستخدم في أعمال الخرسانة الكبيرة التي تتطلب انبعاثاً حرارياً منخفضاً بينما يستخدم النوع الثاني والخامس لمقاومة تأثير الكبريتات.

ويحتوي النوع الثالث على نسبة عالية من سيليكيات الكالسيوم الثلاثية لذا فهو سريع التصلب ذو قوة عالية مكبرة ويظهر انبعاثاً حرارياً عالياً .ويصنع مع زيادة كمية الجبس ويطحن طحناً دقيقاً.

الاسمنت الألوميني:

يحتوي هذا الاسمنت على نسبة عالية من الألومينا ويتألف من البوكسيت والحجر الجيري .يطحن كما الاسمنت البورتلندي ويحمص إلى درجة حرارة تصل إلى 1600°C.

أهم المكونات بعد الحرق :إلمينات الكالسيوم الأحادية، إلمينات الكالسيوم الخماسية، بالإضافية إلى كميات قليلة من سيليكات الكالسيوم الثنائية وسيليكات الكالسيوم الثلاثية وفيرايت الألمنيوم الكالسيوم الثنائية.

يتميز بتصلبه السريع جداً حيث يصل إلى قوته القصوى خلال أربع وعشرين ساعة.

د. الخشب (Wood) :

بشكل عام يكون الخشب طرياً أو قاسياً صمغياً أو قليل الصمغ مصدره أشجار ذات أوراق عريضة أو ذات أوراق أبرية لونه غامق أو فاتح واصطلح على تسميته ذي اللون الغامق(صميمي) وذي اللون الفاتح(رخو).

الأخشاب التي مصدرها أشجار صمغية تكون أقل تقوساً عند الاستعمال عكس قليلة الصمغ.

- الخشب الطري:

1. الخشب الأبيض: نوع رخيص طري قابل للكسر تصنع منه الصناديق التجارية وألواح الطوبار وحشوات الأثاث.
2. خشب السويد : لونه أبيض مصفر مائل للاحمرار يتميز بعدم التقوس والالتواء ويستعمل في صنع الأبواب والأدراج، ومصدره الأشجار التي تنمو في المناطق الباردة.
3. خشب الشوح : ويستخدم في صناعة الخشب المعاكس(ألواح التربلاي)
4. خشب الحور : طري وخفيف ويصنع منه الخشب المعاكس.

- **الخشب الصلب (القاسي):**

1. خشب الزان: متين صلب لونه محمر قابل للتقوس يستخدم في صناعة الأثاث.
2. خشب البلوط: متين صلب لونه أبيض مصفر جميل الشكل يستخدم في صناعة الأثاث والأبواب.
3. خشب الجوز: متين صلب بني اللون غالي الثمن ذو ألياف ظاهرة يستخدم في صناعة الأثاث والأدوات الهندسية.
4. خشب الورد: يشبه الجوز.
5. خشب الماهوجني: أحمر اللون جميل الشكل والألياف واستخدامه مثل الجوز.
6. خشب الابنوس: صلب ثقيل الوزن وأغلى أنواع الخشب لونه أبيض أو أصفر، بني، أحمر، أخضر، وأسود وتستخدم قشرته في صناعة الأثاث.

- **الأخشاب الصناعية:**

خشب اللاتيه، خشب الاوكال، التربلاي والمعاكس.

يصنع خشب اللاتيه من بقايا القطع الخشبية مغطاة على الوجهين بطبقة من التربلاي ويستخدم بشكل واسع في صناعة الأثاث المنزلي.

خشب الاوكال ويصنع من نجارة الخشب الناعمة مكبوسة تحت ضغط عال ومخلوط بمادة غروية لاصقة .رخيص الثمن، ثقيل الوزن ومتانته محدودة ويستخدم في صناعة الأثاث التجاري.

التربلاي يصنع من ألياف خشبية رفيعة على شكل طبقات بحيث تعاكس ألياف الطبقة ألياف الطبقة الثانية لزيادة متانة الألواح .وإذا جمعت عدة طبقات

من التربلاي لزيادة السماكة تسمى الخشب المعاكس ولها استخدامات في الأثاث كما ويستخدم المعاكس المصقول في أغراض الطوبار لإنتاج أوجه اسمنتية مصقولة.

٥. الاسفلت(Asphalt) :

وهي مادة الزفتة، وتستخرج من قطران النفط، لونها أسود داكن، تتميع في درجات الحرارة فوق 30°C، تتميز بأنها مثل الغراء تلتصق بالجسم الذي توضع عليه، وتلصق المواد مع بعضها، وتتميز بأنها مقاومة جداً للماء بحيث لا تمتص الماء أبداً وتمنع تسربه من خلالها بنسبة 100%.

وتستخدم هذه المادة في رصف الطرق بخلطها مع الحصمة، وكذلك في تبطين سقوف المباني لمنع تسرب الماء من خلال الخرسانة، وفي أي استعمالات أخرى في مجال البناء تحتاج منع الرطوبة.

1-4 البوليمرات (Polymers) :

وهي مركبات كيماوية اصطناعية ذات جزئيات ضخمة جداً وصناعتها تعتبر فرعاً من فروع الهندسة الكيماوية حيث يتم استخدام مواد عضوية معقدة (Organic)في صناعتها مثل الفحم والنفط والسيليلوز والتي يكون غالباً الكربون أساس تركيبها.

وتتكون كلمة بوليمرات من مقطعين:

Poly: وتعني متعدد

mers: وتعني جزئيات ضخمة الحجم.

وتعرب كلمة بوليرات إلى(لدائن)، أما الاسم التجاري للبوليمرات فهو البلاستيك(Plastics) .

وأن أبسط أنواع جزئيات البوليمرات هو جزيء البولي ايثلين (Polyethelene) وهي كما يلي:

```
 H   H           H
 |   |         /   \
 C = C        C     C
 |   |         \   /
 H   H           H
```

أي تتآصر كل ذرة كربون مع ذرتين هيدروجين ويكون رمز الايثلين هو C_2H_4 ويسمى هذا التآصر بالتآصر التساهمي وهو يختلف تماماً عن التآصر الايوني الذي يؤدي إلى تكون الأملاح بواسطة التجاذب الأيوني(السالب والموجب).

البوليمرات (البلاستيك) نوعان رئيسيان هما:

أ. بوليمرات تتصلد بالحرارة (بالتسخين).
ب. بوليمرات تتلدن بالحرارة (وتتصلد بالتبريد).

أ. البوليمرات التي تتصلد بالحرارة:

يتم صناعتها أصلاً بواسطة الضغط والتسخين حتى تصير لدنة ثم يتم تشكيلها الشكل النهائي .وإذا تعرضت إلى الحرارة مستقبلاً فإنها لن تلين وإنما تزداد صلادة .وإذا كانت الحرارة عالية أو لمدة طويلة فإنها تنهار وتنكسر.

أنواعها هي:(أنواع البوليمرات التي تتصلد بالتسخين).

1. **المواد الفينولية Phenolics $(C_6H_5OH)_m$**

تتكون من الفينول + الفورمالدهايد + مواد مضافة .وتستخدم في صناعة الفرامل، المواد الغروية واللاصقة، الأجزاء الكهربائية، وفي صناعة الأقمشة القطنية المحسنة، وتتميز بالمتانة ومقاومة الصدمات ومقاومة الرطوبة والتآكل وكذلك في سهولة تشكيلها.

2. مواد امينوفورملدهايد وتسمى كذلك مواد أمينية (Amino) وأهم أنواعها:

أ. الميلامين (Melamine) المشهور بصناعة الصحون والأواني المنزلية.

ب. اليوريا فورملدهايد (Urea) .

وتتميز المواد الأمينية بشكل عام بمقاومتها للحرارة، ومقاومة الذوبان والتفاعل، والصلادة السطحية(مقاومة الخدش)، وثبات اللون .وتستخدم في صناعة المواد الغروة اللاصقة، الأغطية الورقية، الخشب الصناعي الرقائقي، وفي أعمال الديكور، إضافة إلى صناعة الصحون والأواني المنزلية.

3. مواد بوليستر(Polyester) :

وهي مادة مشهورة وتتميز بمقاومتها للاشتعال والتفاعلات، ومقاومتها للحرارة، وانخفاض تكاليفها، وتستخدم في صناعة الأقمشة وأجسام السيارات والقوارب والخوذات وبعض أجزاء الطائرات الخفيفة والقوارب وفي صناعة زلاجات التزلج وفي صناعة المواد اللاصقة والديكور .ويتحمل حرارة حتى 265°C.

4. مواد الابوكسايد(Apoxides) :

وهي مواد لاصقة ومن أشهر أنواعها التجارية هي الأبوكسي والارالدايت . وتستخدم للحام المواد المكسورة والمشروخة.

ب. أنواع البوليمرات التي تتلدن بالتسخين:

1. بولي ايثيلين (Polyethelene) $[CH_2\text{-}CH_2]_m$

وتصنع من الايثيلين ، درجة انصهارها 125°C ← 110°Cوهي مادة قابلة للاشتعال، مقاومة للشد وللضغط وكذلك مقاومة للأحماض والكيماويات . تتميز بالمتانة والمرونة وتستخدم في صناعة تغليف الأسلاك .وفي صناعة الأنابيب والقوارير والتعليب والأنسجة والورق والأواني المنزلية، كذلك تستخدم كمادة

الوحدة الثانية

التركيب البلوري للمواد

2-1 مقدمة:

تعتمد بعض المواد الصلبة على الترتيب الهندسي للذرات وكذلك على التفاعلات المتبادلة بين مكونات الذرة أو الجزيء. حيث دلت الدراسات الحديثة في علمي الكيمياء والفيزياء للمواد الصلبة أن صفات وخواص المادة تعتمد إلى حد بعيد على تركيبها وترتيبها الداخلي على المستوى الذري والجزيئي والمستوى الدقيق وانتهاءاً بالمستوى العياني. يتعلق المستوى الذري بصورة مبدئية بمقدار تفاعل الإلكترونات والنويات داخل المادة. وعلى المستوى الذري والجزيئي تقودنا التفاعلات المتبادلة بين الذرات والجزيئات إلى تحليل الروابط المختلفة التي تتحكم في الحالات الممكنة لتراكيب المادة. أما على المستوى الدقيق فإن ترتيب الذرات والجزيئات في الفراغ يحدد الخصائص المميزة للمادة. ويمكننا المستوى العياني من دراسة سلوك المادة الصلبة باستخدام علم الميكانيكا الاحصائية. يمكن عادة الحصول على الصفات العيانية والحجمية (والتي تمثل متوسط صفات المادة على المستوى الدقيق) من خلال التجارب المخبرية.

2-2 لتركيب الذري (Atomic Structure):

تتكون الذرة من نواة صغيرة جداً، والتي بدورها تتألف من البروتونات والنيوترونات، وهي (النواه) محاطة بالإلكترونات المتحركة. يكون كل من البروتونات والإلكترونات مشحونة بشحنة قيمتها 1.6×10^{-19}، وهذه الشحنة موجبة للبروتونات وسالبة لإلكترونات، أما النيوترونات فهي متعادلة كهربائياً، كتلة مكونات الذرة متناهية في الصفر. كتلة البروتون والنيوترون متساوية تقريباً $(1.67\times10^{-27}kg)$ وهي أكبر من كتلة الإلكترون التي تقارب $(9.11 \times10^{-31}kg)$.

تتميز المواد كيميائياً بعدد البروتونات في النواة (العدد الذري) (Atomic Number (Z)). وهذا يعادل كذلك عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة أو الكاملة. ويتراوح العدد الذري بين (1) للهيدروجين و (94) للبلوتونيوم.

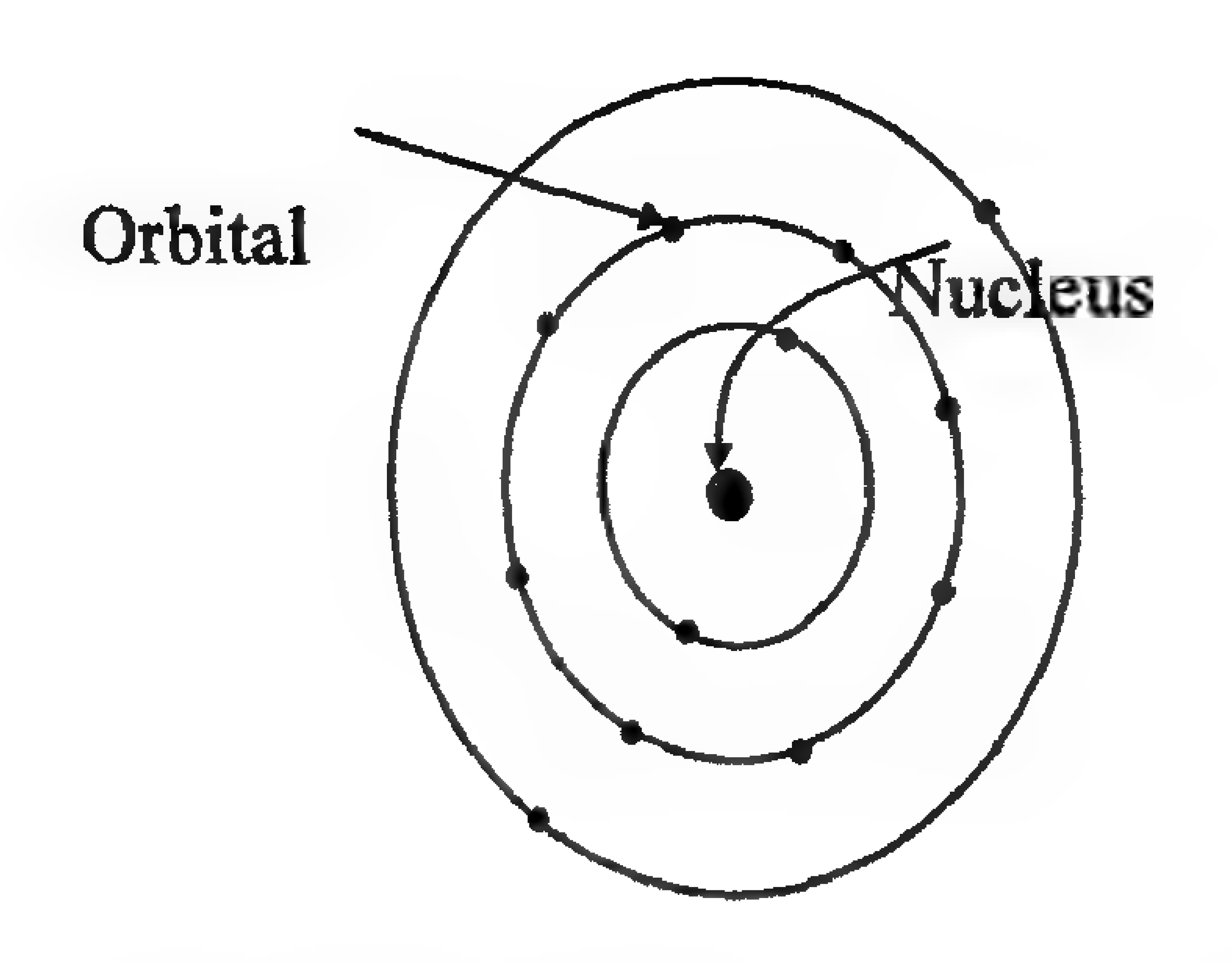
يمكن تحديد كتلة الذرة على أنها مجموع كتلة البروتونات والنيوترونات في النواة. وعلى الرغم من أن عدد البروتونات يكون ثابتاً لجميع ذرات نفس العنصر إلا أن عدد النيوترونات يمكن أن يكون يتفاوت ويمكن بالتالي أن يكون للعنصر أكثر من كتلة ذرية وهذا يسمى الآيزوتوب (IsoTope). ويكون الوزن الذري للعنصر مناظراً لكتلة الذرة المتعادلة. حيث يمكن استخدام كتلة الذرة لإيجاد الوزن الذري (Atomic weight).

2-3 الإلكترونات في الذرة (Electrons in Atoms):

نماذج الذرة (Atomic Models)

تبين في الجزء الأخير من القرن التاسع عشر أنه من غير الممكن تفسير العديد من الظواهر المتعلقة بالإلكترونات باستخدام علم الميكانيكا التقليدية. وقد تبع ذلك وضع حزمة من المبادىء والقوانين التي تربط نظم الذرات وتفاصيل ما دون الذرات سميت ميكانيكا الكم (Quantum Mechanics) ، حيث يتطلب فهم سلوك الإلكترونات في الذرات والبلورات دراسة مبادىء ميكانيكا الكم ولن يتم ذلك في هذا الكتاب.

لقد كان نموذج بوهر للذرة (Bohr Atomic model) أحد نتائج تطور هذه الدراسة. يفترض نموذج بوهر أن الإلكترونات تدور حول النواة ضمن مدارات شبه ثابتة حيث يمكن بصورة عامة تحديد مدار كل إلكترون. ويبن الشكل (1- 2) رسماً تخطيطياً لنموذج للذرة. مبدأ آخر من مبادىء نظرية ميكانيكا الكميات يفيد بأن طاقة الإلكترون لها قيمة محددة.

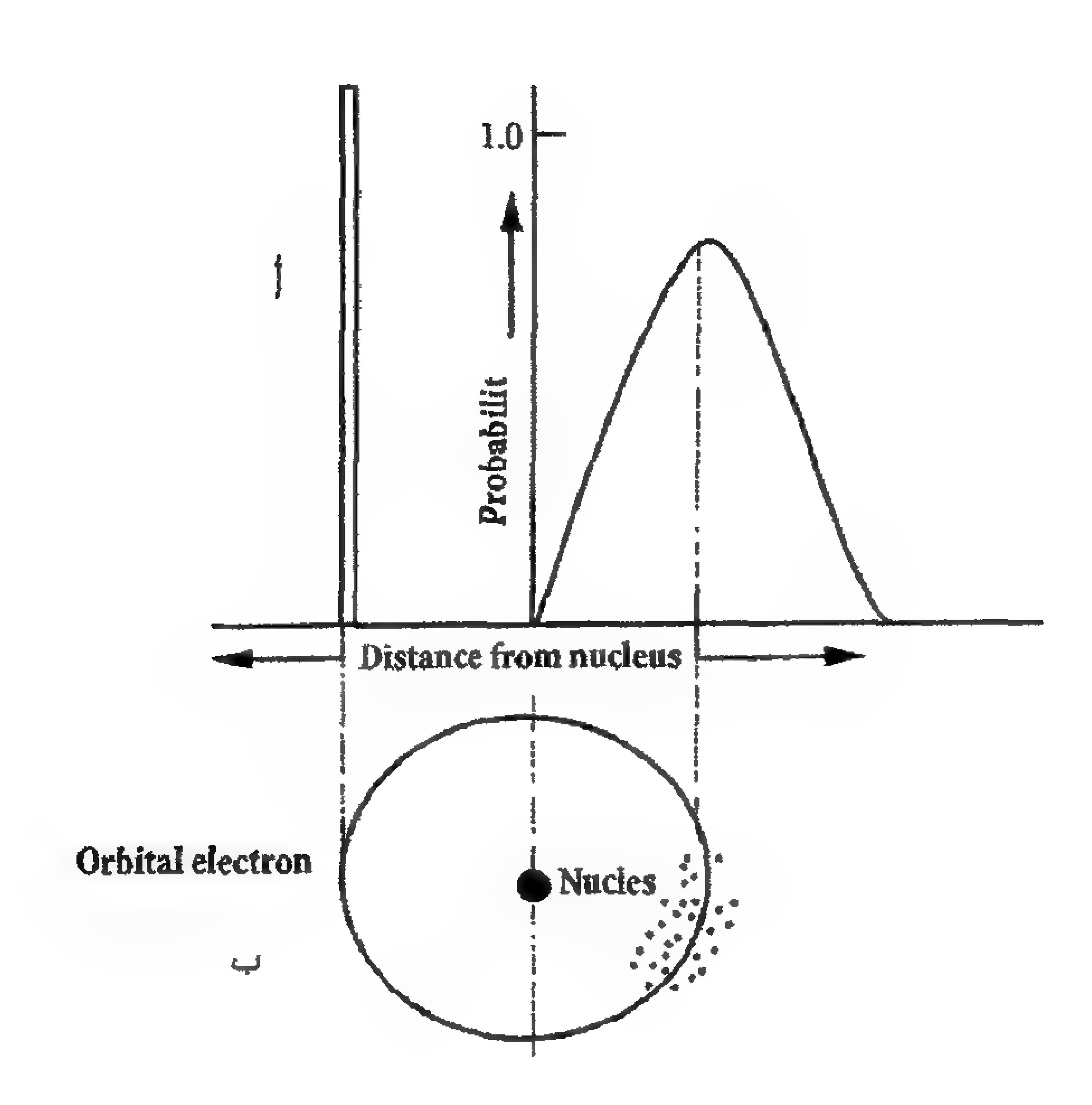


شكل (1- 2) رسماً تخطيطياً لنموذج بوهر للذرة

أي أنه يمكن للإلكترونات أن تكون ذات قيمة محددة من الطاقة. بحيث يكون لكل مدار مستوى محدد من الطاقة. يمكن للإلكترون أن يغير من قيمة الطاقة التي يحملها،وإذا حدث هذا يجب على الإلكترون أن يقفز من مدار إلى آخر ففي حالة امتصاص كمية إضافية من الطاقة (أي عندما تزداد طاقته) يقفز إلى مدار ذو مستوى أعلى من الطاقة. أو يهبط إلى مدار ذو مستوى أدنى من الطاقة في حالة فقدانه (انبعاث) جزء من طاقته. ومن الملائم النظر إلى "الطاقة المسموحة للإلكترون" على أنها مستوى الطاقة "energy level" أو أوضاع الطاقة "energy level".

لقد وجد أن نموذج بوهر للذرة. يحتوي على نقاط قصور هامة وذلك لعدم قدرته على تفسير بعض الظواهر المتعلقة بالإلكترون. وتم الوصول إلى حل لهذه القصورات عن طريق النموذج الميكانيكي الموجي "Wave Mechanical Model" وفيه يعتبر أن الإلكترون يحمل ميزات الجسيم والموجه. وفي هذا النموذج لم يعد يعتبر أن الإلكترون جسيم يدور في مدارات متميزة، بل أصبح موقعه على شكل احتمالية مع احتمال وجود الإلكترون في أكثر من موضع حول النواة بعبارة أخرى يتم وصف مواقع الإلكترونات على أنها توزيعات محتملة حول النواة، أو على شكل

سحابة إلكترونية. كما في الشكل (2- 2). يبين الشكل (أ) موضع الإلكترون في نموذج بوهر والشكل (ب) النموذج الميكانيكي الموجي.



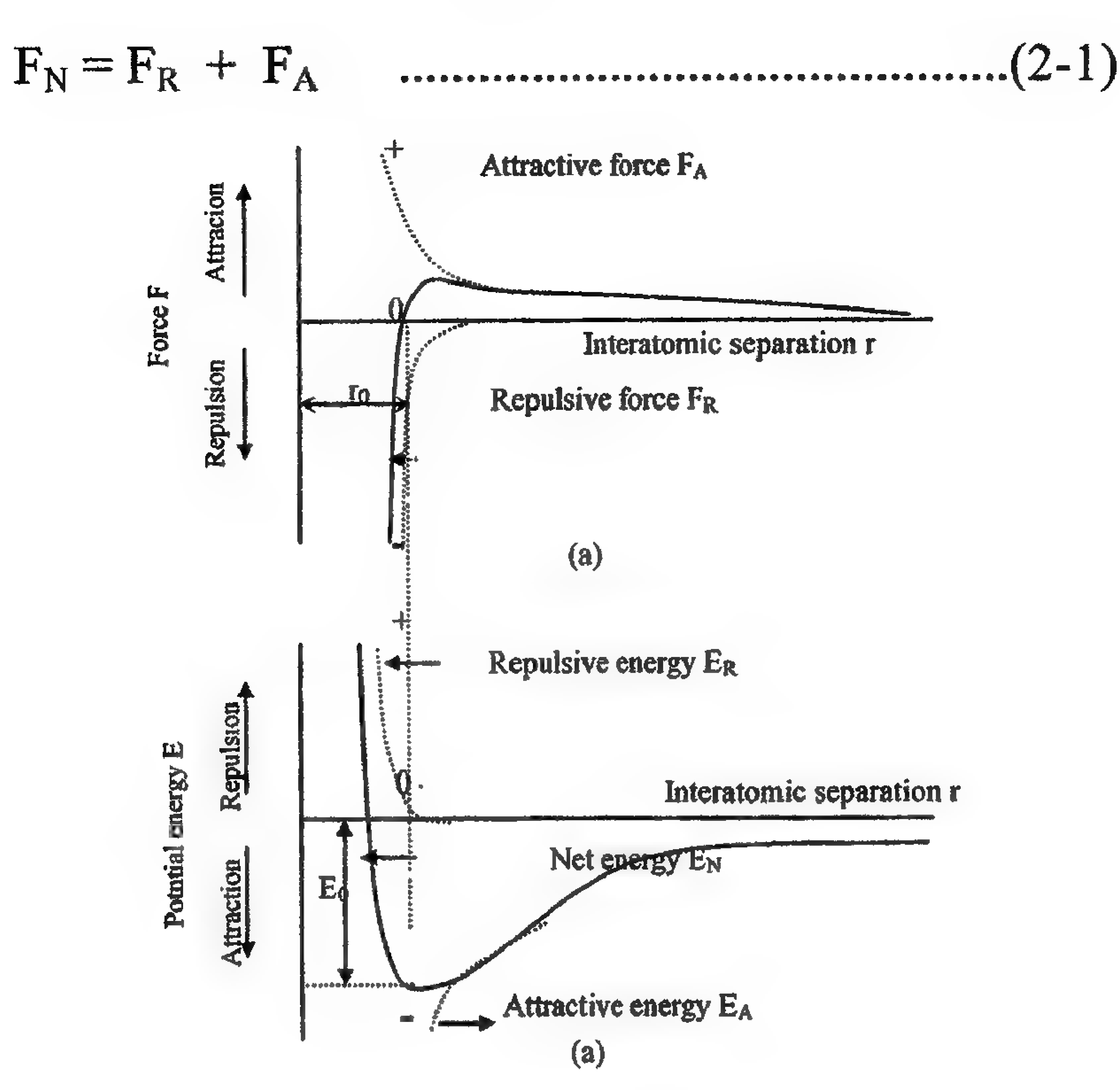
شكل (2- 2)
مقارنة بين نموذج بوهر والنموذج الموجي من حيث مواضع الإلكترونات

2-3 ترابط الذرات في الجوامد Atomic Bonding in Solids:

يتم فهم العديد من الخواص الفيزيائية للمواد عن طريق معرفة القوى المتبادلة بين الذرات والتي تربط الذرات مع بعضها البعض وقد يكون فهم مبدأ الترابط الذري أفضل ما يمكن عن طريق دراسة التفاعل المتبادل بين ذرتين منفردتين يتم تقريبهما من بعضهما البعض إلى مسافة قصيرة جداً. يكون التفاعل المتبادل بينهما مهملاً في وضع التباعد ولكنها تبذل قوى على بعضها البعض عند الاقتراب، وهذه القوى نوعان: تجاذب وتنافر وكل من هذه القوى اقتراناً في المسافة بين الذرات وتعتمد نوعية قوة التجاذب F_A على نوع الرابطة بين الذرات ويعتمد مقدار هذه القوة على الفاصل الذري (المسافة بين الذرات). كما يوضح ذلك الشكل 2.3(a). حيث تبدأ إلكترونات المدار الأخير بالتداخل ويبدأ تأثير قوة التنافر F_R. ويكون صافي

القوة بين الذرتين مجموع قوى التنافر والتجاذب .

$$F_N = F_R + F_A \quad \text{.......................................(2-1)}$$



شكل (3- 2)
اعتماد قوى التجاذب والتنافر على صافي المسافة الفاصلة بين الذرات

وتكون F_N اقتراناً في الفاصل الذري كما يبين الشكل (3- 2) وتضعف F_N كلما ازداد الفاصل الذري إلى أن تتعادل F_R مع F_A وتصبح F_N صفراً.

وعند الوصول إلى وضع الاتزان هذا تكون الذرتان متباعدتان بمسافة محددة وثابتة تسمى مسافة الاتزان r_0 وهي المسافة بين مركزي الذرتين عندما تتساوى قوة التجاذب مع قوة التنافر بين الذرات وهذه المسافة للكثير من الذرات (0.3 nm) وعند هذا الوضع ستحاول الذرات مقاومة أي قوة للفصل بينهما أو تقريبهما من بعضها البعض.

قد يكون من الملائم أحياناً التعامل مع طاقة الوضع بين الذرات (E) والعلاقة بين القوة والطاقة.

$$E = \int F(dr)$$

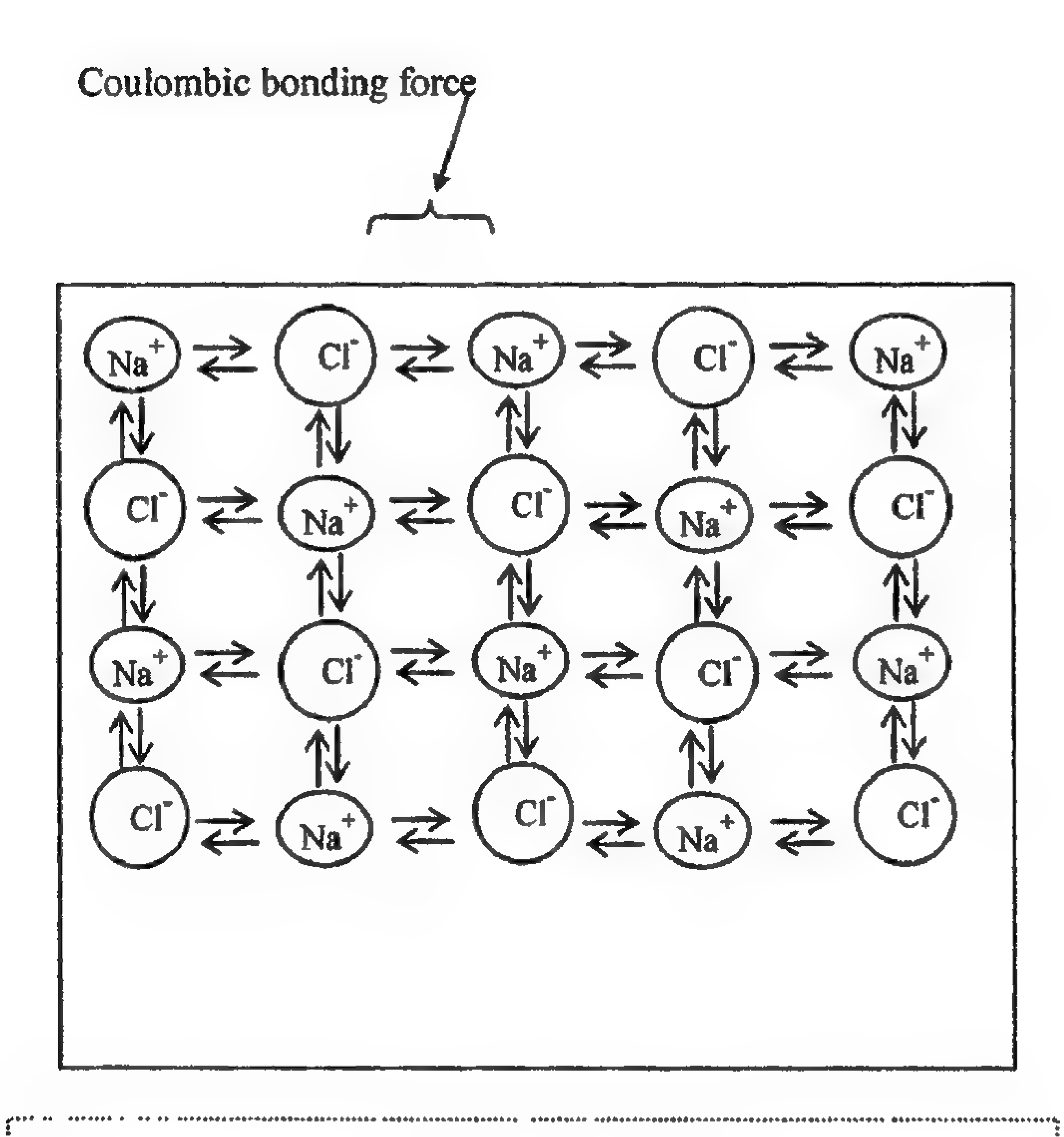
$$E_N = \int F_N(dr)$$

$$= E_R + E_A \quad \text{.......................................(2-2)}$$

يبين الشكل (2-3b) حيث تقترب طاقة الوضع من وضع الاتزان عند تساوي طاقة التجاذب مع طاقة التنافر وهذا يحدث عند الفاصل الذري (r_0) وهو فاصل الاتزان وتسمى الطاقة عند هذا الوضع طاقة الترابط (E_0) Bonding Energy وهي تمثل كمية الطاقة اللازمة لفصل الذرات لمسافة كافية.

يمثل التفسير أعلاه تفسيراً مبسطاً للطاقة بين ذرتين، ولكن للجوامد يكون الوضع أكثر تعقيداً بسبب تواجد عدد كبير من الذرات وتعدد اتجاهات الطاقة بين الذرات. وفي النهاية يكون هناك طاقة ترابط بين الذرات مناظرة للطاقة (E_0)؛ حيث تتفاوت قيمة هذه الطاقة من مادة إلى أخرى. ويعتمد العديد من خواص المواد على (E_0) ، شكل المنحنى وكذلك نوع الترابط بين الذرات. فعلى سبيل المثال تكون المواد ذات طاقة الترابط العالية أيضاً ذات درجة حرارة انصهار عالية. وعندما تكون طاقة الترابط عالية تكون المواد في الحالة الصلبة وعندما تكون الطاقة قليلة تصبح المواد في الحالة الغازية، وتكون الحالة السائلة في وضع طاقة متوسط بين الاثنين. يعتمد معامل مرونة المعدن على شكل المنحنى المرسوم بين قوى الترابط والفاصل الذري وتزداد قساوة المعدن كلما كان ميل المنحنى أكبر، ويكون المنحنى أقل ميلاً للمواد الأكثر مرونة. تتأثر الخواص الحرارية للمادة كذلك بطاقة الترابط إذ ينخفض عامل التمدد الحراري للمعدن كلما زادت طاقة الربط. ويوجد عدة أنواع من الروابط الأساسية أو الكيميائية في المعادن - الرابطة الأيونية والرابطة الفلزية والرابطة المشاركة (التساهمية).

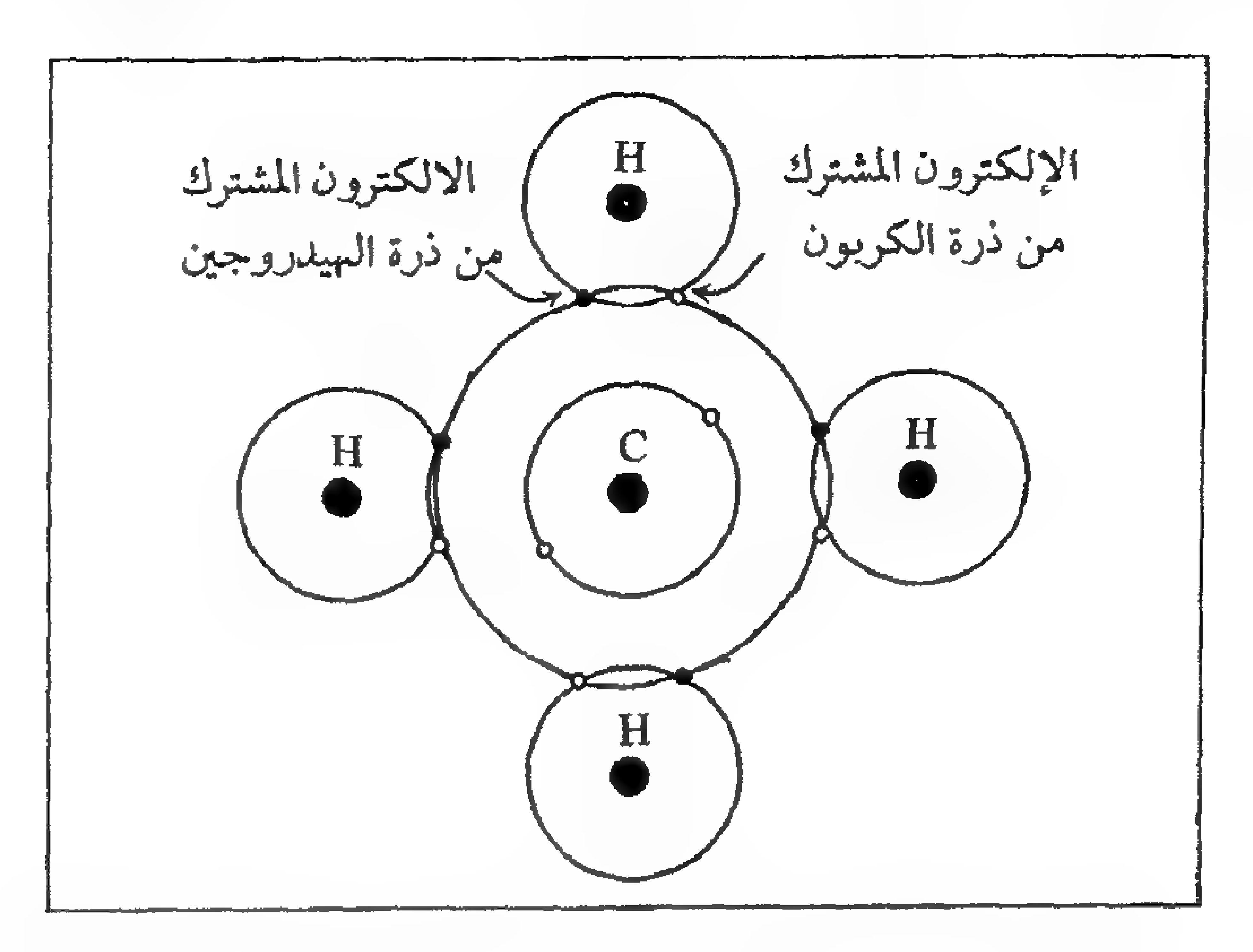
قد تكون الرابطة الأيونية الأسهل وصفاً وإدراكاً. وهي تتواجد دائماً في المركبات المكونة من عناصر معدنية وغير معدنية. حيث تعطي الذرات المعدنية بسهولة إلكتروناتها الحرة إلى الذرات غير المعدنية حيث تصل جميع الذرات إلى وضع الاتزان بالإضافة إلى أنها تصبح ذات شحنة كهربائية (أيونات). يعتبر كلوريد الصوديوم (NaCL) مادة أيونية تقليدية. حيث تصبح ذرة الصوديوم موجبة الشحنة عند إعطاءها إلكتروناً لذرة الكلوريد لتصبح بعدها ذرة الكلوريد سالبة الشحنة ويبين الشكل (4- 2) نموذجاً لهذه الرابطة.



شكل (4- 2)
الرابطة الأيونية لكلوريد الصوديوم

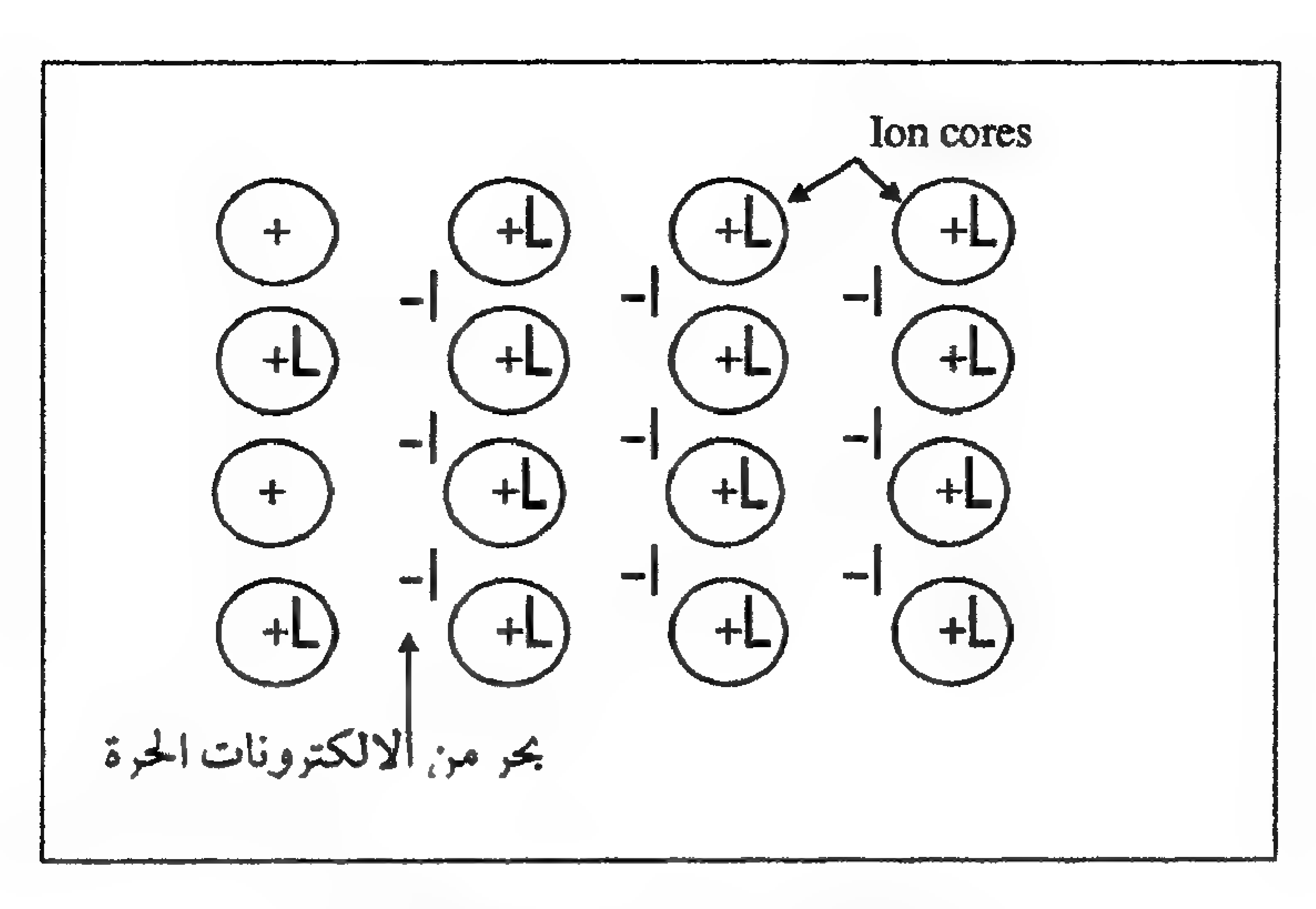
أما في الرابطة المشاركة فإن الذرات تتقاسم الإلكترونات الحرة فيما بينها ويعتبر الإلكترون المشترك في هذه الحالة ملكاً للذرتين وتكثر مثل هذه الروابط في المركبات العضوية. مثل CH_4 كما في الشكل (5- 2) حيث تتشارك أربع ذرات

هيدروجين كل واحدة بإلكترون مع ذرة كربون واحدة وكذلك تساهم ذرة الكربون بأربعة إلكترونات ليصبح عدد الإلكترونات المشتركة ثمانية إلكترونات.



شكل (5- 2) الرابطة التساهمية في جزيء الميثان CH_4

أما الرابطة الفلزية فتتواجد في المعادلة وسبائكها. يكون لدى المعادن إلكترون واحد أو اثنين وأقصى حد ثلاثة إلكترونات للروابط. وفي هذا النوع من الروابط لا تكون الإلكترونات حكراً على ذرة محددة ولكنها تكون حرة بالتنقل داخل المعدن مكونة بحراً أو سحابة من الإلكترونات كما في الشكل (6- 2) وتشكل الذرات مع باقي الإلكترونات الغير حرة ما يسمى اللب الأيوني "Ion Core" الذي يمتلك شحنة موجبة تعادل بالمقدار عدد الإلكترونات الحرة لكل ذرة.



شكل (6- 2) الرابطة الفلزية

2-4 تركيب الجوامد (Structure of Solids):

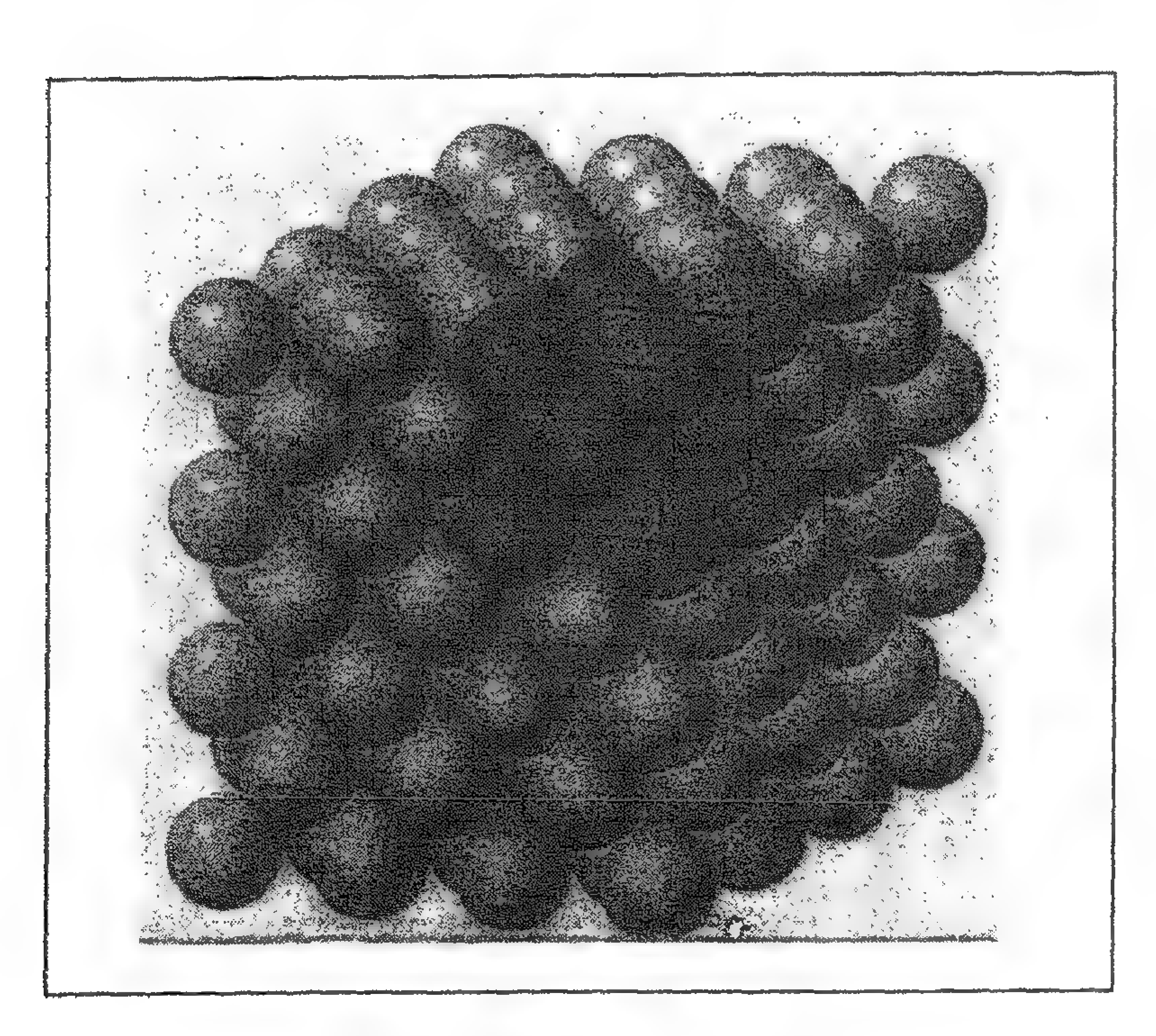
يطلق اسم الجامد (الصلب) على تجمع أو تكدس الذرات، الأيونات أو الجزيئات لتكوين مادة ذات حجم وشكل ثابتين ومحددين. وتتميز الجوامد عن السوائل والغازات بقدرتها على مقاومة القوى التي تحاول فصل جزئياتها عن بعضها البعض، أو قدرتها على الرجوع إلى شكلها الأصلي بعد زوال القوى التي تؤدي إلى تشوهات طفيفة.

يمكن أن يتراوح تركيب الجوامد من بسيط إلى معقد للغاية. تترتب الذرات في الجوامد بأشكال منتظمة وأهم ميزة في تركيب الجوامد هي التكرار الدوري لنفس الترتيب. ويسمى كل ترتيب متكرر لمجموعة من ذرات المعدن بلورة (Crystal) وهذا يعني أن كل بلورة تمثل ترتيباً محدداً للذرات أو مجموعة الذرات لتصبح ذات نمط (Pattern) متكرر ومنتظم، وينتج هذا النمط من التكرار اللامتناهي في الفراغ لوحدات تركيبية متطابقة تتراوح هذه التركيبات بين البساطة والتعقيد وتختلف أنماط الترتيب والتركيب من معدن إلى آخر، وهذا يؤدي إلى اختلاف خواص المعادن تبعاً لاختلاف أنماط الترتيب والتركيب.

2-5 التراكيب البلورية (Crystal Structure):

بينا أن ذرات المعدن تترتب بأنماط لانهائية في الفراغ بحيث تقسمه إلى وحدات حجمية متساوية، دون أن تترك أن حيز في الفراغ، وتسمى كل نقطة من نقاط هذا التركيب نقطة شبيكة (Lattice Point). بحيث تكون النقاط الأخرى المحيطة بها مشابهة لها بصورة تامة.

ويسمى أصغر حجم يحتوي على النمط الكامل للترتيب المتكرر "وحدة خلية" (Unit cell). ويبين الشكل (7- 2) وحدة الخلية. وفي حال رص وحدات الخلايا يجب أن تملأ الفراغ تماماً لتكوين الشبيكة الفراغية.



شكل (7- 2) وحدة الخلية

تسمى وحدة خلية بدائية عندما تكون نقاط الشبيكة موزعة في الزوايا فقط. كما في الشكل (8- 2). تحتوي وحدة الخلية البدائية على نقطة شبيكة فراغية واحدة فقط، لأن كل نقطة في الزوايا الثمانية المشتركة تشترك بقدر

متساو مع ثماني وحدات خلايا مجاورة. ويسمى طول البعد لوحدة الخلية ثابت الشبيكة (Lattice Constant). ويوجد أربعة أنواع من وحدة الخلية:

1. بسيط .
2. مركزي القاعدة.
3. مركزي الجسم.
4. مركزي الأوجه.

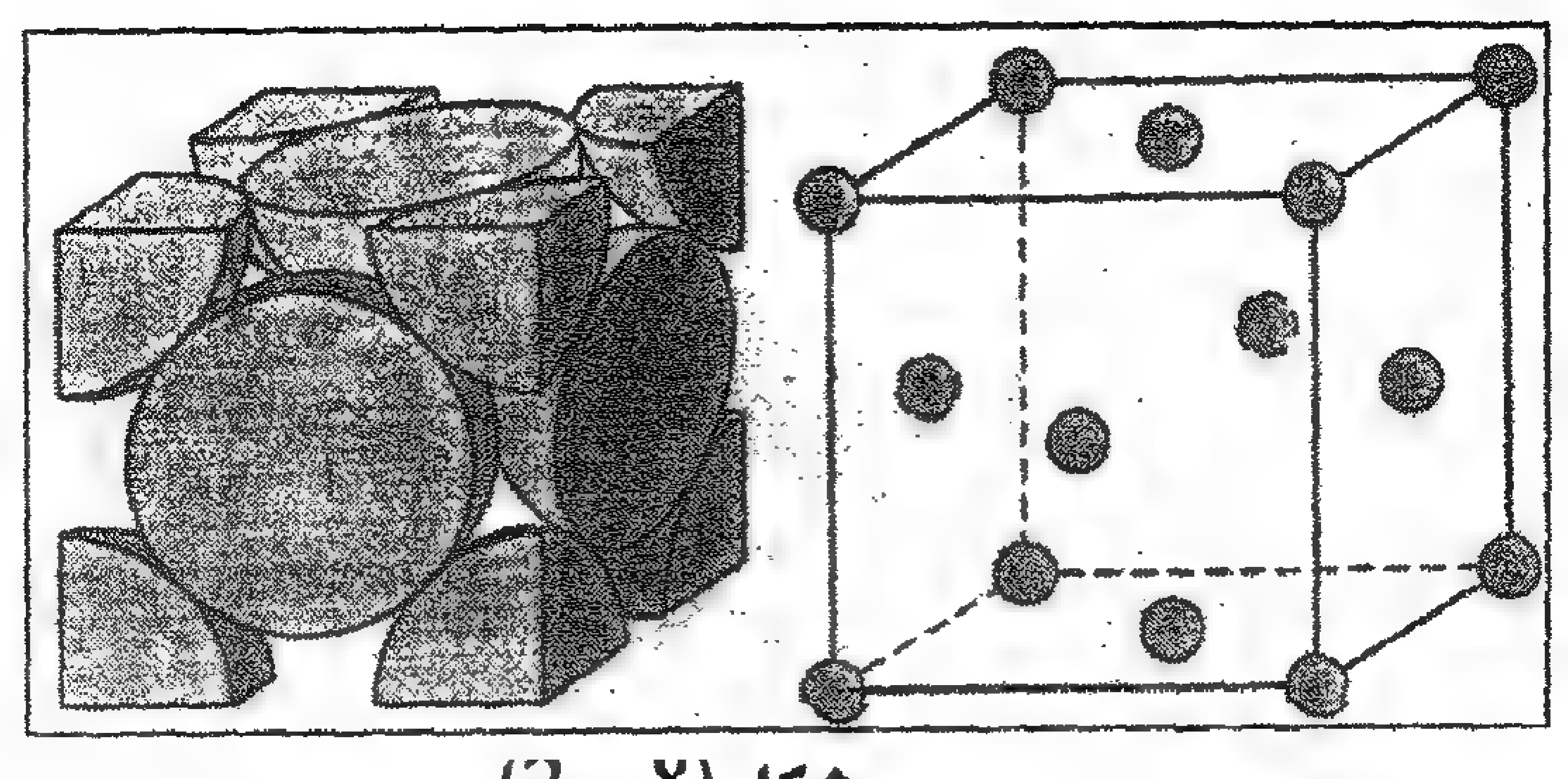
فعلى سبيل المثال يوجد في النظام البلوري المكعب ثلاثة أنواع من وحدة الخلايا : مكعب بسيط، مكعب مركزي الجسم ومكعب مركزي الأوجه.

2-6 التراكيب البلورية للمعادن (Metalic Crystal Structure):

تكون الروابط الذرية في المعادن البلورية روابط فلزية وليس لهذا النوع من الروابط أي محددات لعدد ووضع الذرات المجاورة، وهذا يقود إلى عدد كبيرة نسبياً من الذرات المجاورة وكثافة الرص، وينطبق هذا على غالبية التراكيب البلورية للمعادن. والأشكال الأكثر شيوعاً للتراكيب البلورية للمعادن هي: مكعب مركزي الوجه (FCC)، مكعب مركزي الجسم (BCC) وسداسي مرصوص (HCP).

المكعب مركزي الوجه (FCC):

تتواجد ا لذرات في هذا النموذج على جميع زوايا المكعب وكذلك ذرة في مركز كل وجه من أوجه المكعب كما في الشكل (8- 2) وبعض المعادن المألوفة التي تتخذ هذا الشكل البلوري ه النحاس، الألمنيوم، الفضة، والذهب.



شكل (8- 2)

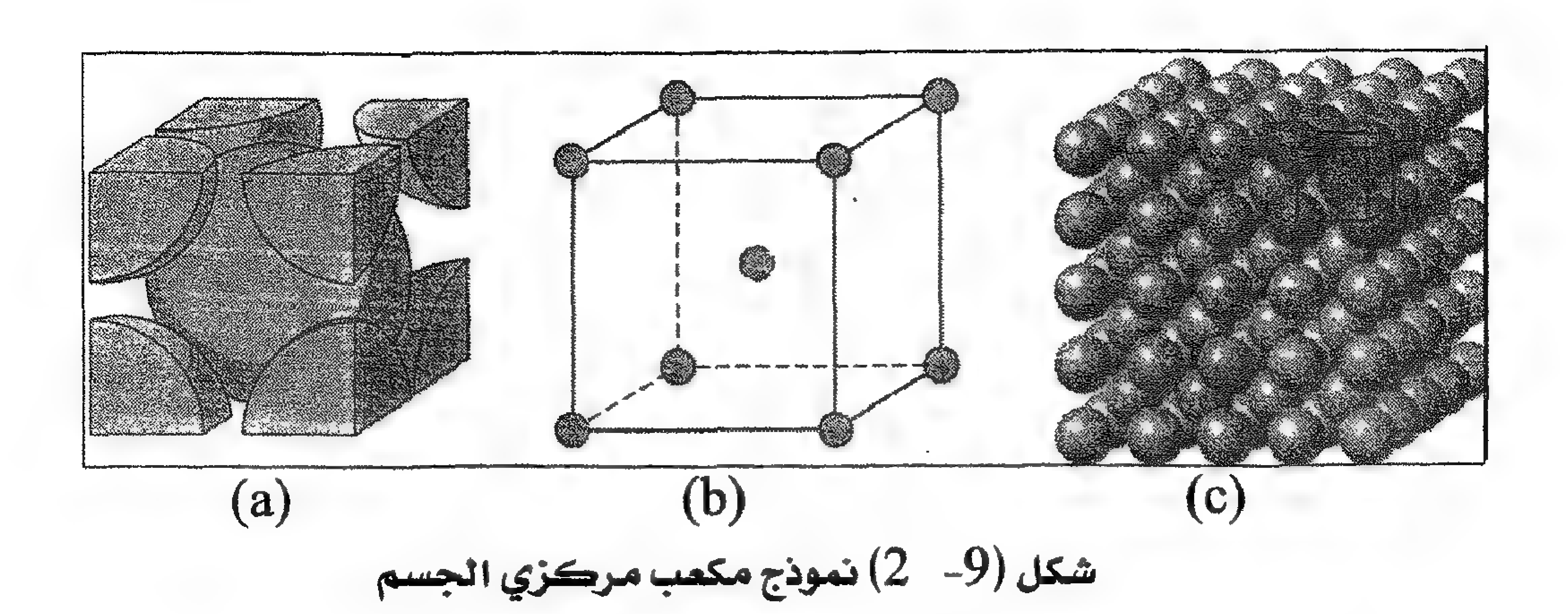
نموذج مكعب مركزي الوجه

تشترك كل ذرة من ذرات زوايا المكعب في ثماني وحدات خلية، بينما تنتمي ذرة مركز الوجه إلى وحدتي خلية. لذا فإن كل وحدة خلية تتألف من $\frac{1}{8}$ ذرة على كل زاوية من زوايا المكعب،ونصف ذرة لكل من الوجوه الستة للمكعب ، ليكون مجموع الذرات في وحدة الخلية الواحدة أربعة ذرات فقط. وهذا يتضح من الشكل (2-7a).

وتكون مواضع الذرات متساوية تقريباً في هذا النموذج، لذا فإن نقل زوايا المكعب من ذرة الزاوية إلى مركز ذرة الوجه لن يغير من تركيب وحدة الخلية.

المكعب مركزي الجسم (B.C.C.)

النموذج الثاني الشائع للفلزات هو المكعب مركزي الجسم المبين في الشكل (9- 2) (أ،ب) . يحتوي هذا النموذج على ما يعادل ذرتين لكل وحدة خلية (ذرة في مركز الجسم و ($\frac{1}{8}$) ذرة مشتركة لكل من 8 وحدات خلايا). وبما أن عدد الذرات أقل منها في المكعب مركزي الوجه فإن معدل الرص هنا يكون أقل منه في المكعب مركزي الوجه. ومن المعادن التي تتخذ هذا النموذج : الكروم، التنغستون وحديد الزهر (السكب).



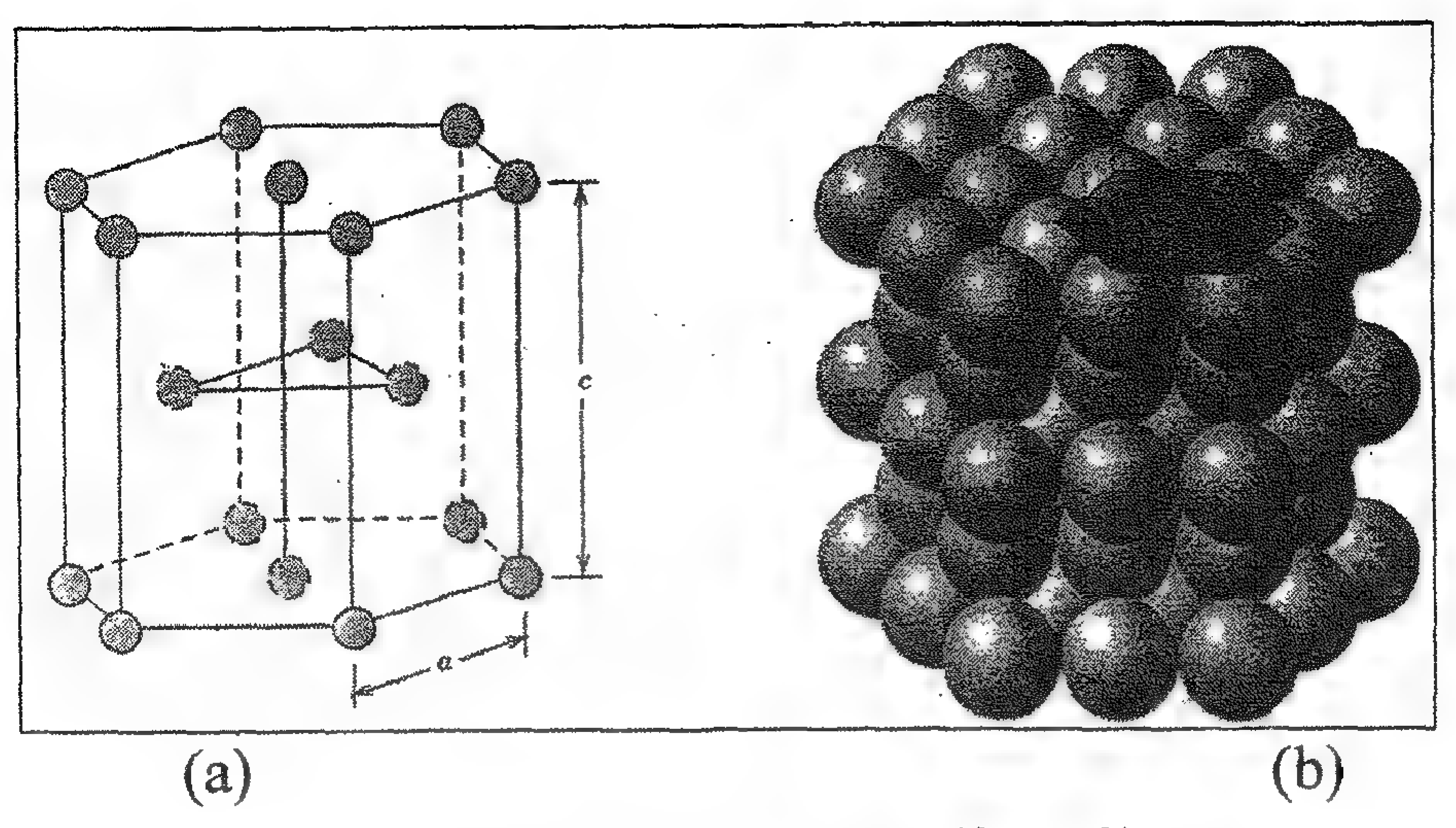
شكل (9- 2) نموذج مكعب مركزي الجسم

النموذج السداسي المرصوص (H. C. P):

(Hexagonal Close Packed Structure)

يبين الشكل (10- 2) هذا النموذج بحيث يحتوي كل من الوجهين العلوي والسفلي ذرة في كل زاوية وذرة في مركز الوجه، ويوجد هنالك مستوى آخر في وسط المجسم السداسي يحتوي على ثلاث ذرات، وبذلك تحتوي كل وحدة خلية على ما يعادل ستة ذرات.

$\Big[\left(12\times\frac{1}{6}\right)$ للوجهين العلوي والسفلي + $2\times\frac{1}{12}$ لمركز الوجهين العلوي والسفلي + 3 في المستوى الوسطي $\Big]$



شكل (10- 2) النموذج السداسي المرصوص

2-7 التماثل البلوري (Crystal Symetry):

يلاحظ من النظر إلى النماذج المختلفة للتراكيب البلورية للمعادن أن كل وحدة خلية تتخذ شكلاً يشابه شكل الوحدة المجاورة لها، ويلاحظ كذلك تماثل التركيب في كل بلورات المعدن الواحد، ومن أهم عناصر هذا التماثل البلورية: المركز (Centre)، المحور (Axis) والمستوى (Plane).

فمركز التماثل هو نقطة داخل البلورة بحيث أن أي خط مستقيم يمر من هذه النقطة يجب أن يمر بنقطتين متناظرتين تقعان على نفس المسافة من نقطة المركز ولكن على طرفين متعاكسين من المحور المار بنقطة المركز.

أما محور التماثل فهو خط يمر داخل البلورة بحيث لو دارت البلورة بمقدار محدد عادت إلى نفس مظهرها الأصلي، ويمكن للبلورة أن تحتوي على محاور أحادية، ثنائية ، ثلاثية، رباعية، أو سداسية. تناظر على التوالي زوايا °360،°180، °120، °90، °60.

ومستوى التماثل هو المستوى الذي إذا قسمت منه البلورة إلى قسمين كان كل جزء مرآه للجزء الآخر. أي يناظره بشكل مقلوب جانباً.

2-7 أنصاف الأقطار الذرية (Atomic Radei)

نظراً لطبيعة السحابة الإلكترونية، فإن نصف قطر الذرة كمية غير معرّفة تماماً، ويعتمد نصف قطر الذرة على نوع الرابطة وعلى التركيب الهندسي للذرات. لذا تأخذ أنصاف أقطار الذرة قيماً تختلف باختلاف نوع التركيب والرابطة الكيماوية. وفيما يلي وصف موجز لكل منها.

أنصاف أقطار الرابطة المشاركة(Covalent Radei):

يؤخذ عادة نصف قطر الرابطة المشاركة كنصف المسافة بين نواة ذرتين متشابهتين يكونان رابطة تشاركية أحادية وعندما تختلف الذرات في السالبية الكهربائية، تصبح الروابط أقصر في الطول وينتج ذلك عن وجود قوة تجاذب كهربائي ساكنة إضافية بين الذرتين. وتختل قيم الطول عندما تكون الرابطة وتختلف احادية، ثنائية أو ثلاثية. فمثلاً يكون طول رابطة الكربون (C-C) الأحادية (154Pm)، وطول الرابطة الثلاثية (C-C) (135Pm)

أنصاف الأقطار الفلزية (Metalic Radei)

تكون أنصاف أقطارها أكبر من أنصاف أقطار رابطة التشارك للعناصر المناظرة. وتتغير أنصاف الأقطار أيضاً مع تغير عدد الترابط التناسقي (Coordination Number)، أو عدد أقرب ذرات مجاورة، فعلى سبيل المثال عدد الترابط لعنصر الصوديوم (8) ونصف قطره الذري (185Pm)، ويناظره نصف قطر تشاركي (157Pm).

أنصاف أقطار الرابطة الأيونية (Ionic Radei):

يكون الأيون الموجب أصغر بكثير من الذرة المتعادلة وينتج ذلك عن مقدار الإلكترونات السالبة، بينما يكون الأيون السالب أكبر بكثير من الذرة المتعادلة المناظرة، وينتج ذلك عن كسب إلكترونات في المدارات الخارجية. وتنقص قيم

أنصاف الأقطار مع زيادة الشحنة الموجبة في مجموعات الأيونات المتشابهة إلكترونياً والتي لها نفس التركيب في المدارات الإلكترونية.

2-8 الرص الذري (Atomic Packing):

تتحكم طريقة ترتيب الذرات والأيونات في الجوامد بخواص المادة. ويعتمد ترتيب ورص الذرات على أنصاف الأقطار النسبية للذرات وعلى طبيعة (نوع) الترابط بين الذرات.

وأكثر الطرق ملائمة لتعيين كثافة الرص هي استخدام معامل الرص الذري (APF) والذي يعرف على أنه:

$$APF = \frac{\text{حجم الذرات لكل وحدة خلية}}{\text{حجم وحدة الخلية}}$$

ويمكن حساب كثافة الرص الحقيقية لجامد متبلور إذا عرف نوع وحدة الخلية، وأنصاف الأقطار الذرية لذلك الجامد.

والعكس صحيح، فإذا عرفت كثافة ونوع التركيب، يمكن حساب نصف القطر الذري وثابت الشبيكة (المسافة بين الذرات) وتستطيع في نفس الوقت تقدير معامل الرص الذري للبلورة .

فعلى سبيل المثال اعتبر وحدة خلية لبلورة مكعبة ذات ثابت شبيكة (a) ، ونمط يحتوي على (n) من الذرات في البلورة فيكون وزن وحدة الخلية مساوياً لوزن الذرات في وحدة الخلية، ويمكن إيجاد وزن الذرات لكل وحدة خلية من العلاقة:

$$W = \frac{nM}{N_A}$$

حيث: M : الوزن الذري

n : عدد الذرات

N_A : عدد أفوجادرو

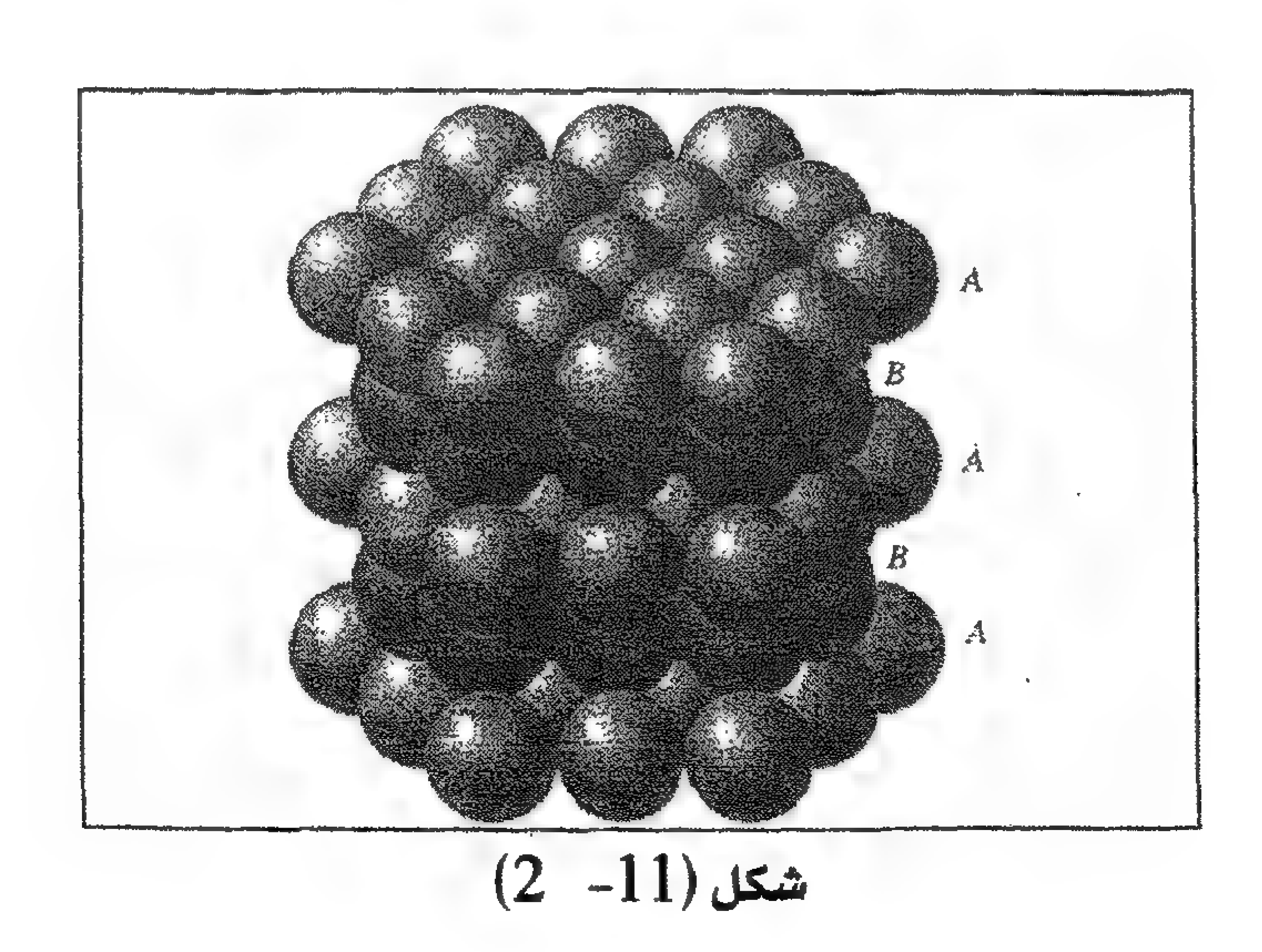
وبما أن حجم وحدة الخلية هو (a^3) (البلورة مكعبة) فإن الكثافة (e) تساوي وزن وحدة الخلية مقسوماً على الحجم:

$$e = \frac{nM}{N_A . V}$$

حيث V : حجم وحدة الخلية.

2- التراكيب البلورية المرصوصة Close - Packed Crystal Structrues

يعتبر التركيب البلوري مكعب مركزي الوجه و السداسي المرصوص من أكثر أنواع التراكيب فعالية، ويمكن اعتبار أن لهذان النمطان الكثافة الأعلى للسطوح . ويبين الشكل (11- 2) جزءاً ن سطح مرصوص لهذه الأنماط.



شكل (11- 2)

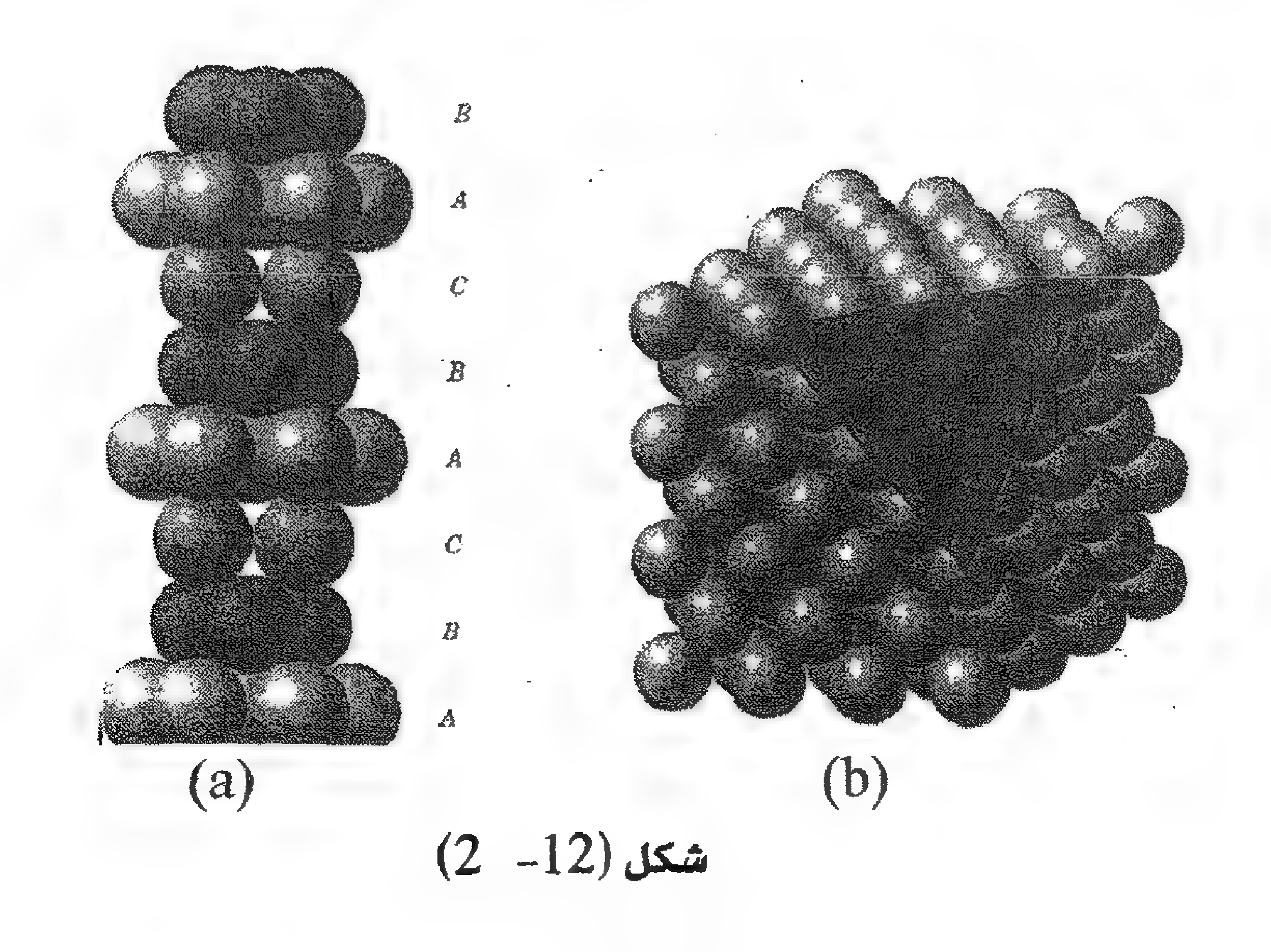
لو أعطينا الرمز (A) لمراكز الذرات لأحد هذه السطوح، ويرتبط مع هذا

السطح مجموعتان من مثلث مكافىء متشكل من ثلاث ذرات متجاورة، بحيث يجلس فوقها السطح التالي. يعطى الرمز (B) للمثلث الذي يشير رأسه إلى الأعلى بينما يعطى الرمز (C) للمثلثات التي يشير رأسها للأسفل.

يمكن وضع سطح مرصوص آخر بحيث تكون مراكز ذراته فوق مواقع (B) أو (C). ويسمى نظام الترتيب للسطوح في هذه الحالة (AB) المبين في الشكل (b). يبدأ التمييز بين النمط المكعب المرصوص والنمط السداسي المرصوص في موضع السطح المرصوص الثالث.

للنمط السداسي يتم وضع الطبقة الثالثة بحيث تكون مراكزها على استقامة مع السطح (A). ويتم تكرار هذا النمط من التكديس (ABABAB). وكذلك سيكون النمط (ACACAC) مكافئاً للنمط (ABAB) كما في الشكل (12- 2).

لنمط المكعب المرصوص مركزي الوجه يتم وضع السطح الثالث بحيث تكون المراكز فوق(C) للسطح الأول. وهذا يؤدي إلى النمط (ABCABCABC). أي أ، استقامة مراكز الذرات تتكرر كل ثلاثة سطوح.



شكل (12- 2)

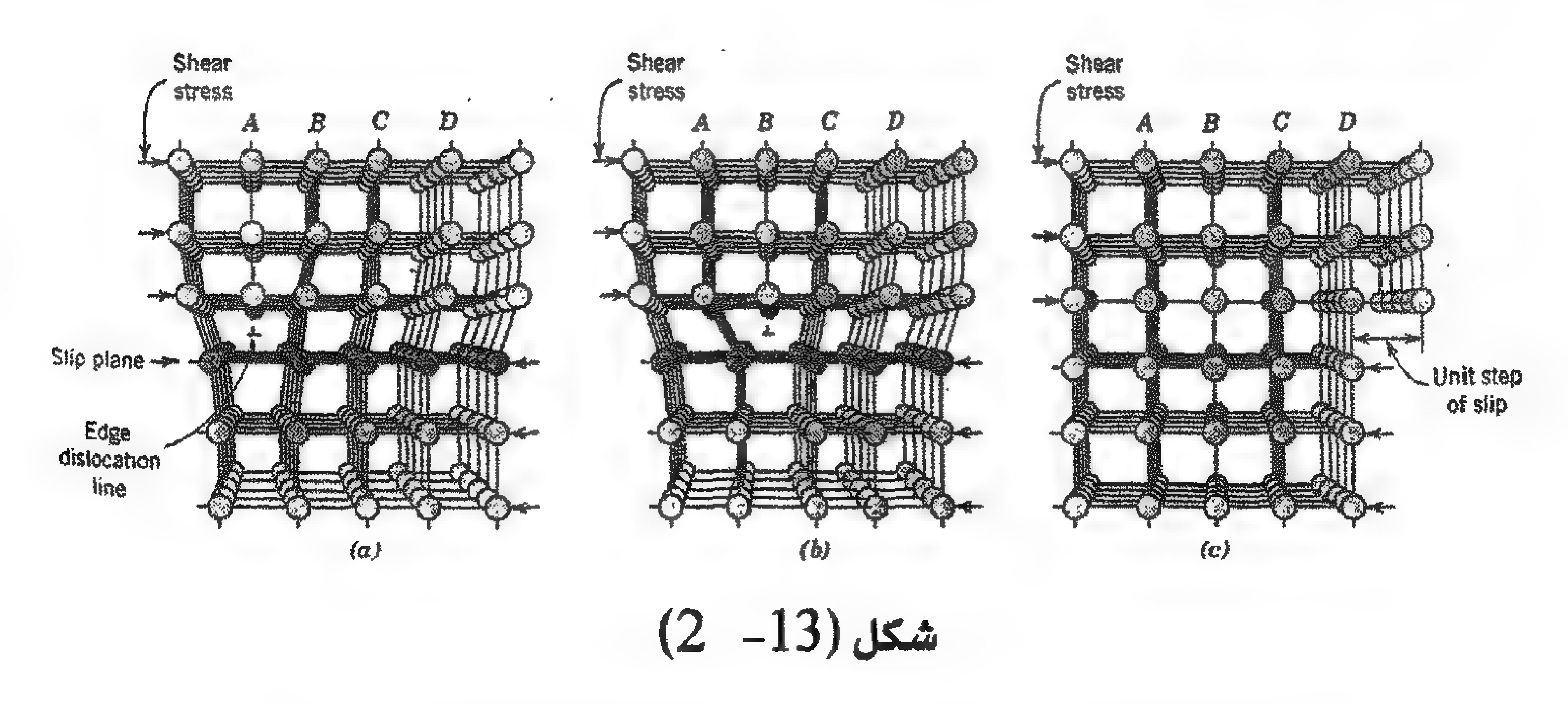
2-9 التشوهات في التركيب البلوري (الانخلاعات) (Dislocations):

يمكن اعتبار الانخلاع بأنه اضطراب خطي للترتيب الذري ناتج عن إزاحة مجموعة من الذرات في البلورة عن المجموعة المجاورة. فالانخلاعات هي عيوب خطية توجد في الجوامد المتبلورة وتنتج عن تشوهات في الشبيكة. تلعب هذه الانخلاعات دوراً هاماً في السلوك الميكانيكي للمواد وتؤثر في خواصها مثل المتانة وتفسر سلوك الخضوع اللدن للمواد وطراوتها. ومن ناحية أخرى فقد أمكن لهذه الانخلاعات أن تفسر لماذا تقل قوة الجوامد التجريبية عن قيمة قوتها النظرية المشتقة من المعادلات.

أنواع الانخلاعات (Types of Dislocations):

يوجد نوعان مميزان من الانخلاعات: انخلاع الحافة Edge dislocation والانخلاع البريمي (Screw Doslocation) وإذا تواجد النوعان معاً يتكون ما يسمى بالانخلاع الخليط (Mixed Dislocation).

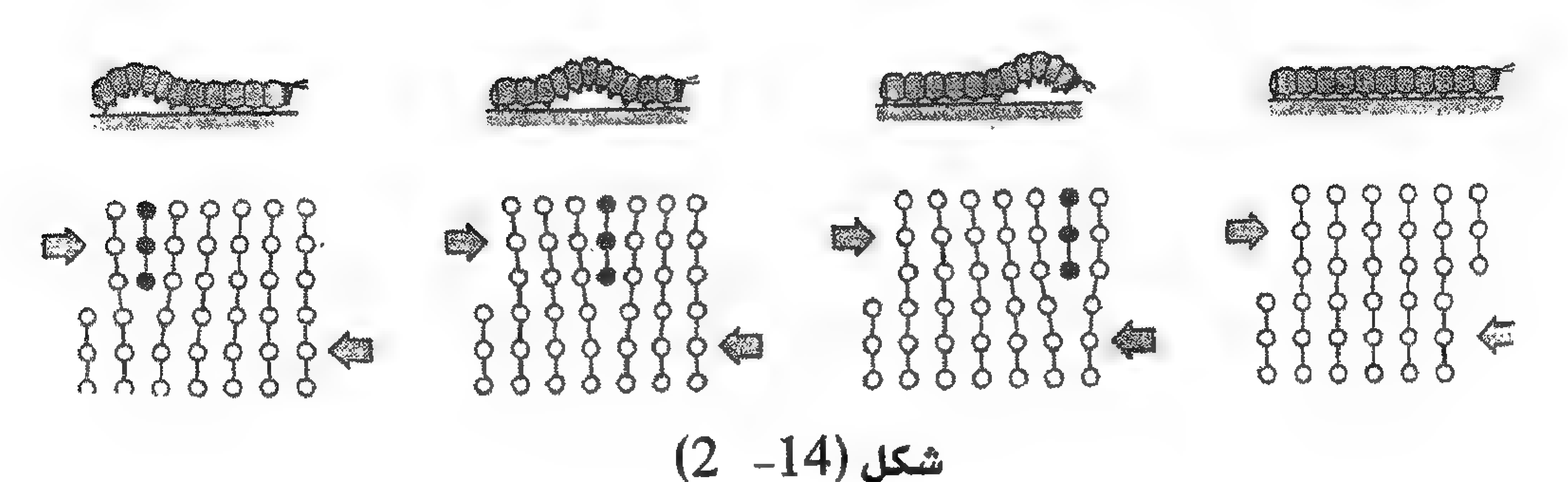
يحدث انخلاع الحافة في البلورة بإدخال نصف مستوى ذري إلى داخل التركيب البلوري كما في الشكل (13- 2) .



شكل (13- 2)

عملية إعادة ترتيب الذرات التي ترافق حركة الانخلاعات

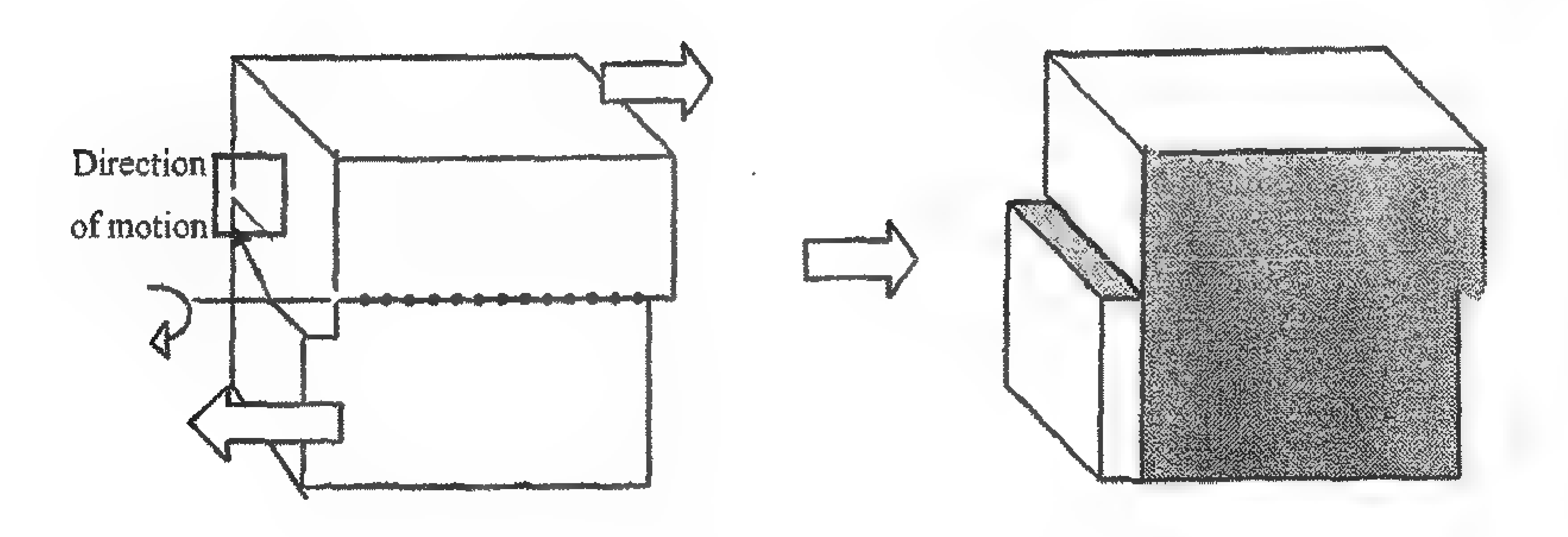
يحدث التشوه اللدن في المواد كنتيجة لعدد كبير من الانخلاعات. يتحرك انخلاع الحافة كنتيجة لقوى القص. فعند بذل قوى القص على المعدن يتحرك نصف المستوى الإضافي (الصف A) في الشكل (a)، حيث يتم دفعه بقوة لداخل المعدن لكي يتم إزاحة انصفا المستويات المجاورة ويبرز في النهاية نصف مستوى على حافة المعدن (الشكل C). وتسمى عملية إنتاج التشوه اللدن عن طريق تحريك الانخلاعات بالانزلاق (Slip) . ويبين الشكل (14- 2) نموذجاً لحركة الانخلاع (انخلاع الحافة) التي تكون موازية لاتجاه القوة.



شكل (14- 2)

حركة انخلاعات الحافة

أما الانخلاع البريمي فيكون في اتجاه متعامد مع اتجاه الإجهاد (القوة) كما في الشكل (14- 2).



شكل (15- 2) الانخلاع البريمي

الوحدة الثالثة

السبائك

3-1 مقدمة (Introduction):

من المهم جداً فهم السبائك وتشكلها وكذلك فهم منحنيات الأطوار للسبائك نظراً لوجود علاقة متينة بين التركيب المجهري للبلورات والخواص الميكانيكية وغيرها. كما وأن تطور التركيب المجهري للسبيكة مرتبط مع منحنى الطور للسبيكة. وتزودنا منحنيات الطور للمحاليل الصلبة بمعلومات قيمة عن الانصهار، السكب، والتبلور وغيرها من الظواهر.

سنلقي في هذه الوحدة بعض الضوء على المحاليل الصلبة وأنواعها وخواصها، سبائك اليوتكتيك الحديدية، منحنيات الطور ومنحنيات الاتزان، تأثير السبائكية على سلوك المعادن أثناء التصلب، الذائبية التامة، نصف الذائبية وانعدام الذائبية في الحالة الصلبة.

3-2 المحاليل الصلبة Solid Solutions:

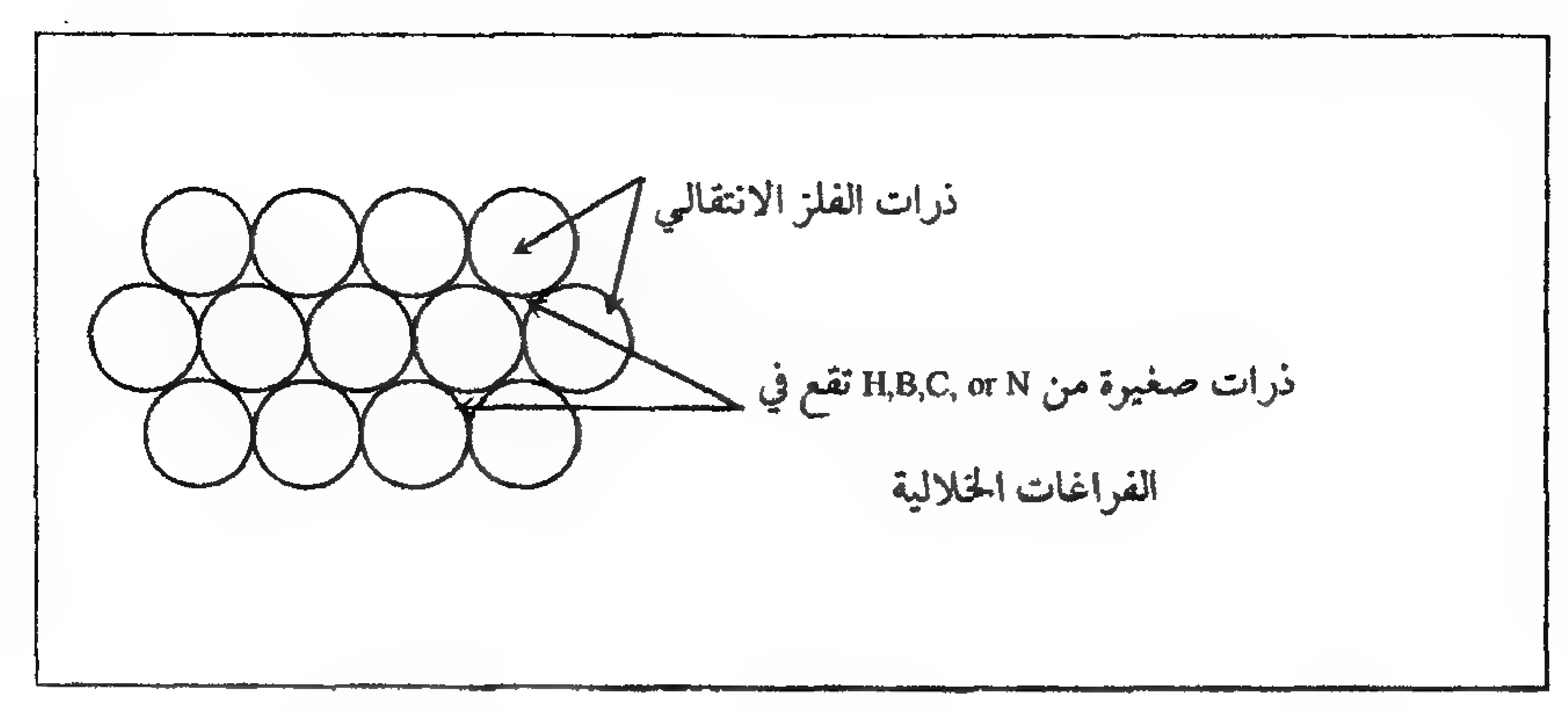
يمكن تعريف المحلول بأنه مزيج متجانس من مادتين أو أكثر، تنتشر فيه ذرات أو جزئيات مادة ما عشوائياً خلال مادة أخرى بنسب مختلفة. وإذا ما تم تطبيق هذا التعريف على المواد الصلبة فإننا نحصل على ما يسمى "المحلول الصلب". الفارق بين المحلول الصلب والمحلول السائل أن حجم الذرات أو الجزئيات المذابة في المحلول السائل ليست ذات أثر على الذائبية، بينما لا ينطبق هذا الحال على المحاليل الصلبة، إذ أن تناسب حجم ذرات المادة المذابة وحجم ذرات المادة المذيبة له أثر كبير على مدى الذائبية ويطلق على المحلول الصلب اسم "سبيكة" (Alloy) وهي نوعان:

1. المحاليل الابدالية (Substitutional):

ينتج المحلول الجامد الإبدالي أو الإحلالي عندما تحل الذرات المذابة مكان الذرات المذيبة في التركيبة البلورية للعنصر، لذا فمن المهم أن يكون هناك تقارب في أنصاف أقطار الذرات لكي لا يؤدي ذلك إلى تشوهات في شكل البلورة للسبيكة الناتجة، كما وأن مقدار الذوبان سيكون محدوداً جداً إذا كان الفرق في أنصاف أقطار الذرات 15٪ أو أكثر، أما إذا كان الفرق أقل من ذلك وكان لها نفس العدد من الإلكترونات في المدار الأخير (إلكترونات التكافؤ) فإن عملية الإبدال تتم بدون أي تشوه يذكر للشبيكة البلورية ويفضل ألا تزيد النسبة عن 8٪. كما وأن الذوبان الإبدالي يتأثر كثيراً بالسالبية الكهربائية للعناصر، ويفضل أن يكون العنصران لهما نفس التركيب البلوري ويؤدي اختلاف السالبية الكهربائية إلى تكوين مركبات كيماوية وبالتالي ذوبانيته أقل. وسيكون من السهل ذوبان الفلز ذو التكافؤ الأقل في الفلز ذو التكافؤ الأكبر . يزداد معدل الذوبان عادة بارتفاع درجة الحرارة ويقل بانخفاضها. مما يؤدي (في حالة انخفاض درجة الحرارة) إلى الترسيب على شكل محلول صلب متجانس مما ينتج عنه ظاهرة التقسية (Hardening) للسبيكة تكون المحاليل الصلبة إما ابتدائية وهي التي تأخذ التركيب البلوري للعنصر المذيب وتنصهر عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة المذيب. وأما محاليل ثانوية،وهذه تأخذ شكلاً بلورياً يختلف عن تراكيب العناصر المكونة للسبيكة، وتنصهر عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة العناصر المكونة لها.

2. المحلول الخلالي (Inerstitial Solution):

تكون ذرات العنصر المذاب صغيرة لدرجة تسمح لها بالتواجد بين ذرات العنصر المذيب كما في الشكل (1- 3) ومن أهم العناصر التي يمكنها تكوين محاليل صلبة خلالية مع الفلزات : الهيدرجين ، الكربون، النيتروجين، والبورون.



شكل (1- 3) تراكيب خلالية

أمثلة على المحاليل الإبدالية:

1. Cu + Zn (النحاس والخارصين) : يعطي مزيج هذان العنصران النحاس الأصفر. تكون الإذابة بين هذين العنصرين عالية جداً، ويمكن أن تصل نسبة الخارصين في النحاس إلى 40% لتنتج سبيكة نحاسية ذات صفات محسنة.
2. Cu + Ni (النحاس والنيكل) : ذو تركيب بلوري F.C.C.
3. Ca + Mg (الكالسيوم + المغنيسيوم) ذو تركيب بلوري سداسي H.C.P.
4. النحاس الأبيض (Cu2Zn3).
5. ألمنيوم خفيف الوزن عالي المتانة (CuAL2).
6. كربيد الحديد (Fe3C) وكربيد المنغنيز (Mn3C) وكربيد الكروم (Cr3C) وكربيد التنغستون (WC) . وتتميز هذه المركبات بصلادة عالية ومقاومة للخدش والتآكل.

ويمكن تلخيص العوامل المؤثرة في قابلية الذوبان في الحالة الصلبة كما يلي:

1. عندما تتشابه البنية البلورية لكل من المذيب والمذاب تكون قابلية الذوبان أعلى منها بكثير في حالة اختلاف البنية البلورية.
2. الحجم الذري، وهو ما يعبر عنه بأنصاف الأقطار الذرية، إذ ان تقارب الحجوم الذرية يسهل عملية الإبدال بين الذرات دون حدوث تشوهات في البلورات.

3. التكافؤ النسبي لذرات الفلزات: من الأسهل للفلز منخفض التكافؤ الذوبان في فلز ذو تكافؤ أعلى.
4. كلما كان المذاب أكثر سالبية والمذيب أكثر إيجابية كانت النتائج سبائك ذات أواصر أكثر ثباتاً بين الفلزات.

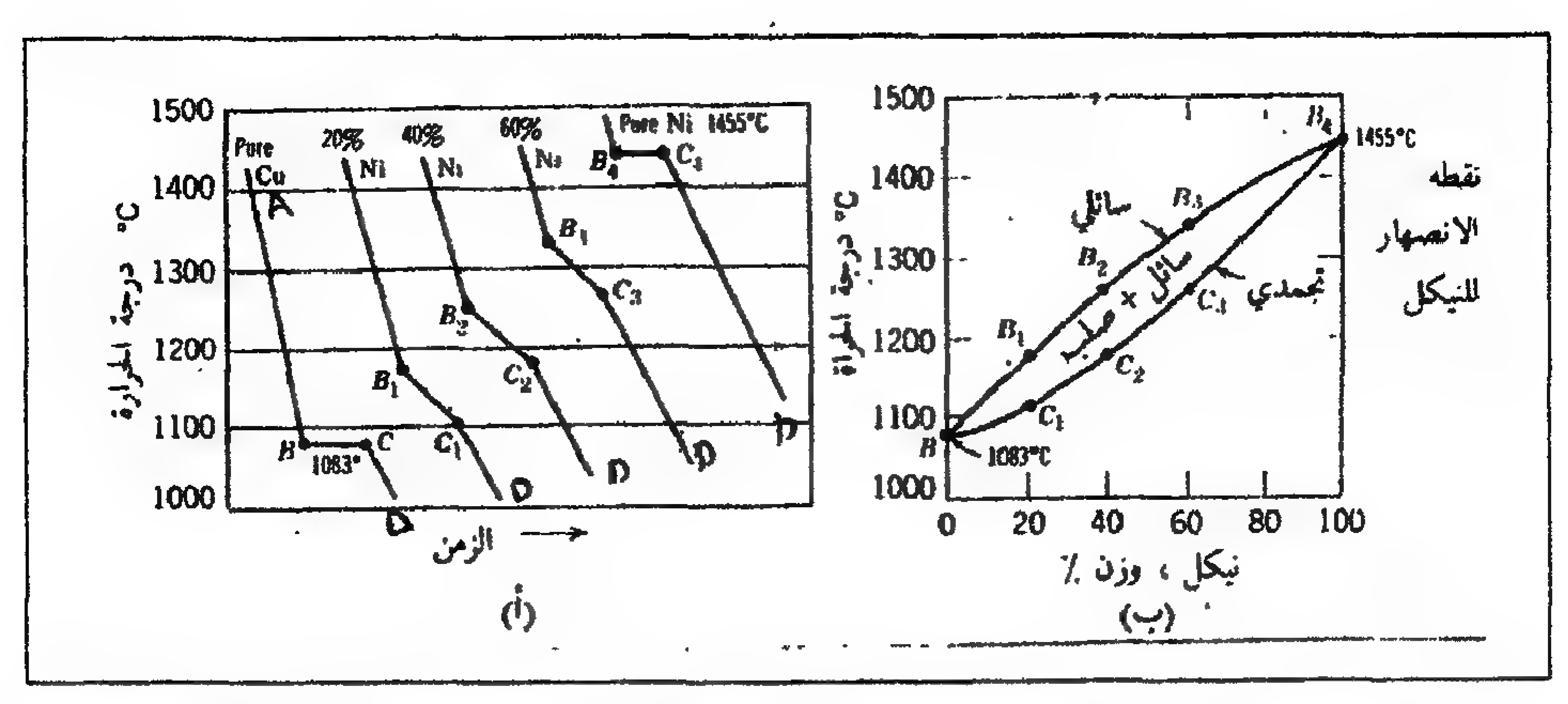
3-3 منحنيات الاتزان (Equilibrium diagrams):

تعتبر منحنيات الاتزان أو منحنيات تعادل الطور من أهم المصادر التي تقدم معلومات عن سلوك المواد في مختلف عمليات التطبيق. فهي تزودنا بمعرفة التركيب الكيماوي والاستقرار الطوري عند تغير درجات الحرارة والضغط والتركيب الكيماوي. بالإضافة إلى أنها تسمح بدراسة العمليات الهامة والتحكم فيها مثل فصل الطور، تصلب الفلزات والخزفيات، التلبيد بالضغط والحرارة، تنقية المواد، نمو وصب البلورات الأحادية السباكة والتغيرات التركيبية الناتجة عن المعاملات الحرارية وغيرها. وتمدنا منحنيات الطور بالمعلومات عن النظام عندما يكون في حالة اتزان، وتساعد في تفسير علاقات الطور والتغيرات التركيبية الكيماوية والبناء التركيبي عندما لا يكون النظام في حالة اتزان.

ومنحنى الاتزان عبارة عن رسم بياني بين التركيب (على الإحداثي السيني) ودرجة الحرارة (الإحداثي الصادي).

وتعرف حالة الاتزان للسبائك بأنها الحالة التي تتواجد عندها مكونات السبيكة عند أقل وضع للطاقة تحت ظروف محددة من ضغط ودرجة حرارة وتركيز بحيث لا يتغير النظام دون حدوث أي تغيير في هذه الظروف.

يمكن بناء منحنى الاتزان للمحلول الصلب بوجود سلسلة من منحنيات التبريد لسبيكة لها تراكيب كيماوية مختلفة. كما يتضح من سبائك النحاس- النيكل. شكل رقم (1- 3).



الشكل (2- 3) رسم منحنيات الاتزان من منحنيات التبريد لسبائك المحلول الجامد Cu-Ni (أ) منحنيات التبريد (ب) منحنى الاتزان.

عند رسم درجات الحرارة المناظرة للنقاط العليا على منحنيات التبريد $(B, B_1, B_2, B_3, ...)$ مع التراكيب المناسبة للسبيكة نحصل على منحنى يسمى (الخط المسائل) (Liquid Line) .

وعند رسم درجات الحرارة المناظرة للنقاط المنخفضة $(C, C_1, C_2, ...)$ نحصل على منحنى يسمى خط الجامد (Solid Line). تمثل النقطتان (B, B_4) نقاط انصهار مواد نقية. أما المنطقة الواقعة بين الخطين (السائل والجامد) فهي تحتوي على طورين (سائل + صلب) في حالة اتزان ، فهي تحتوي على بلورات جامدة لمحلول صلب متجانس ذو تركيب مناسب، أما المنطقة التي تعلو الخط السائل فيوجد فيها طور واحد سائل فقط، وتحتوي المنطقة أسفل خط الجامد على طور واحد جامد فقط.

وفي تفسير منحنيات التوازن الحراري فإننا نجد أن التعريف والقواعد التالية تكون ذات نفع:

أ. تسمى المساحات الواقعة في المنحنى بمجالات الصنف phase fields وعند عبور خط فاصل مائل من مجال لآخر فإن عدد الأصناف يتغير دائماً بمقدار صنف واحد أي أن مجال صنفين مستقلين ينفصلان دائماً بحدود

مزدوجة تحتوي على كلا الصنفين.

وفي النظام الثاني نجد أن الأصناف الثلاثة تتواجد مع بعضها عند نقطة فقط مثل نقطة اليوتيكتيك.

ب. عند نقطة P (شكل 3- 3) في مجال وجود صنفين يمكن تواجد كلا من الصنفين السائل والصلب معاً، إذا أخذت درجة حرارة أفقية عند نقطة P فإن التركيب الكيميائي للصنف الصلب، يمثل بنقطة × وتركيب المحلول السائل المتواجد في حالة توازن معه ينثل بنقطة Y، أما نقطة P نفسها فتمثل التركيب الكلي للخليط.

ج. تمثل الكميات النسبية لكل من السائل والصلب عند P بالأطوال النسبية Py،Px

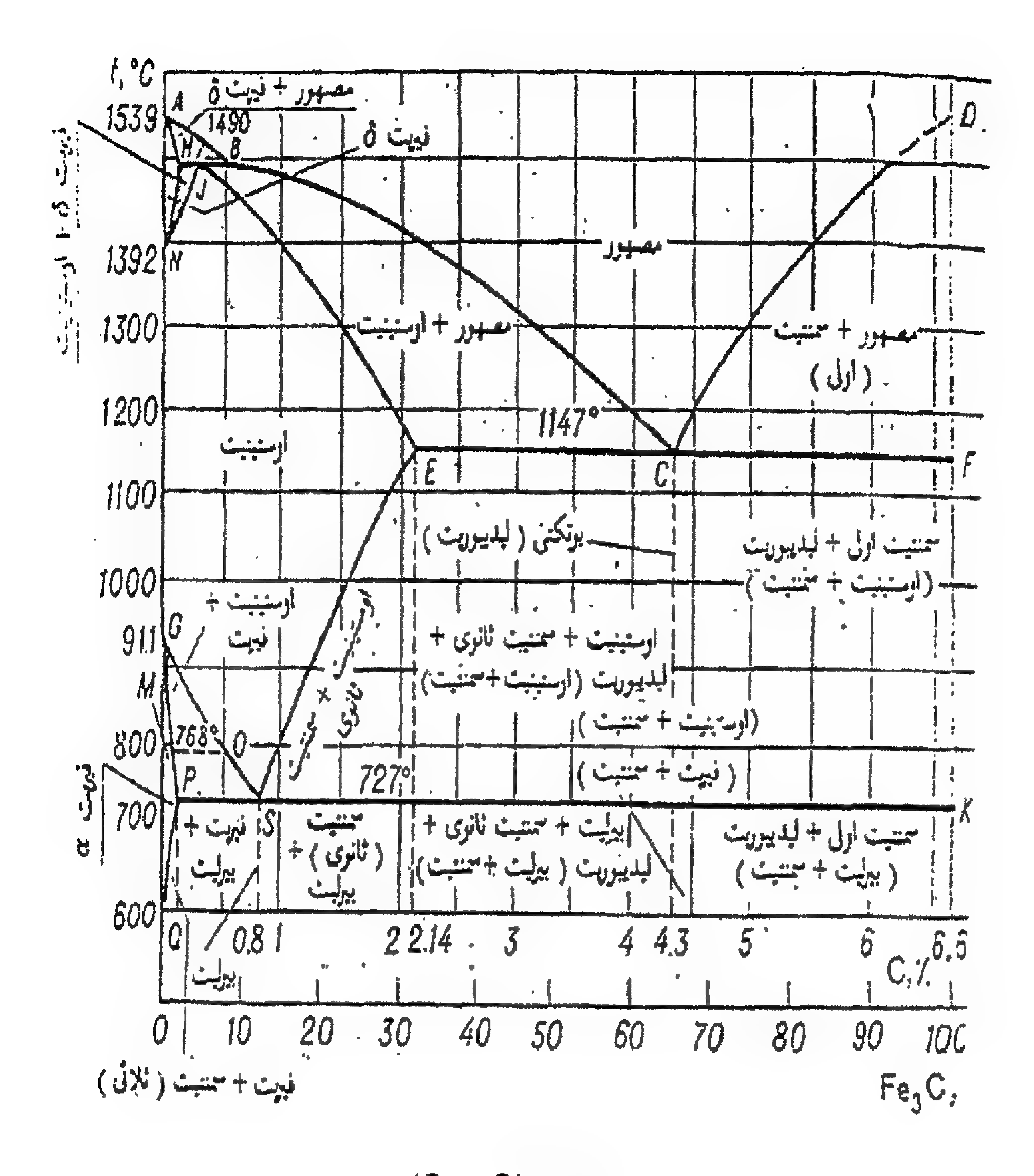
وزن المحلول الصلب × Px= وزن المحلول السائل × Py

أو $\frac{\text{وزن المحلول الصلب}}{\text{وزن المحلول السائل}} = \frac{PY}{PX}$

غالباً ما يعرف ذلك بقاعدة الرافعة للأسباب المبينة للمهندسين Lever Arm

د. الصنف الذي لا يحتل مجالاً لنفسه ولكنه يظهر فقط في مجال مزدوج الأصناف يكون إما معدناً أو مركباً معدنياً بتركيب ثابت.

ه. إذا رسم خطاً رأسياً يمثل تركيباً لسبيكة معينة قاطعاً خطاً في المنحنى ذلك يعني أن هناك تغييراً يحدث في عدد الأصناف عند تلك النقطة أي أن هناك صنفاً يظهر أو يختفي.



الشكل (2- 3)

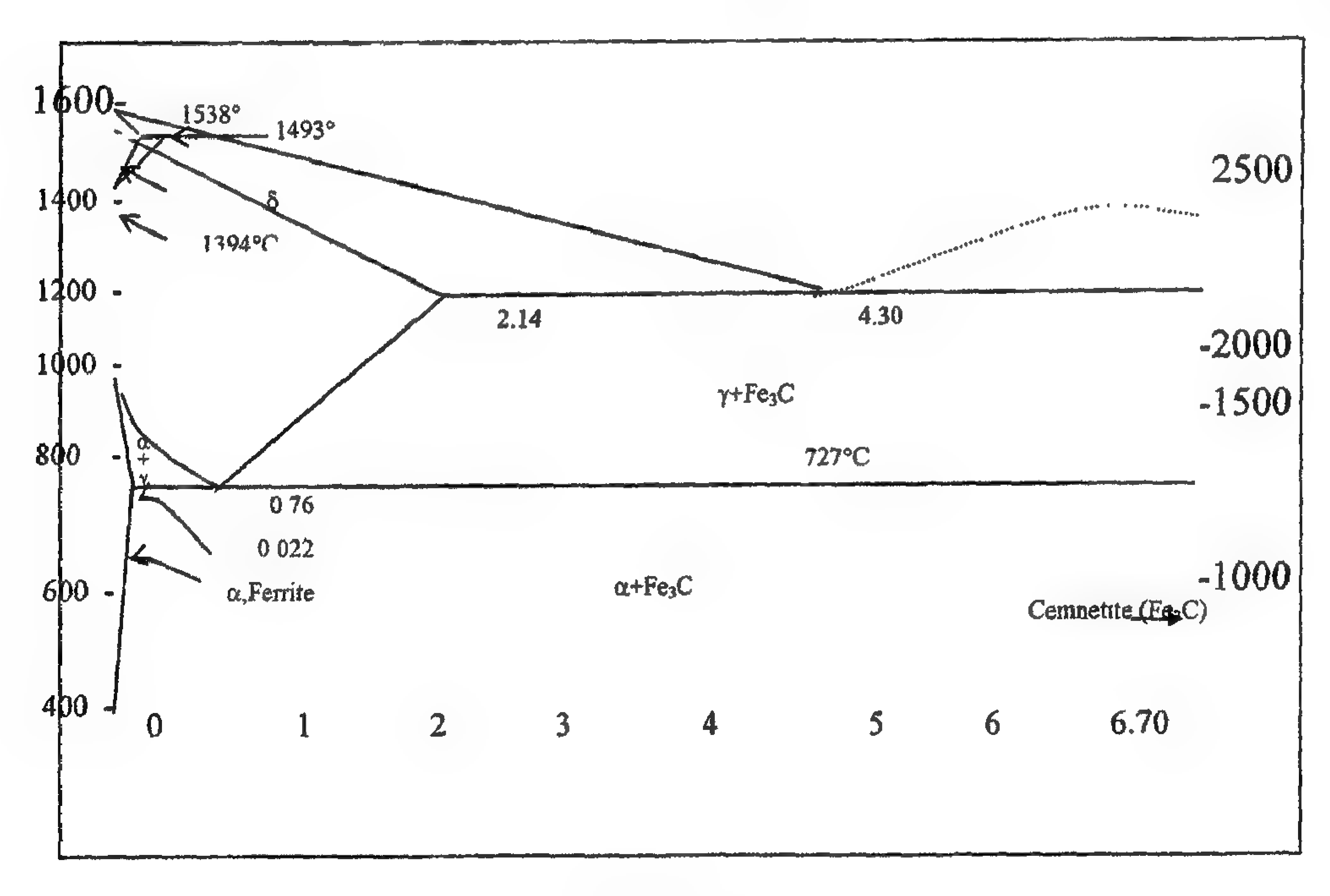
الرسم البياني للأطوار لمجموعة الحديد (Fe) وكربيد الحديد (Fe_3C)

3-4 منحنى الاتزان لنظام الحديد - الكربون

Iron - Carbobn Equilibrium Diagram

من بين جميع المنحنيات يمكن اعتبار منحنى الحديد - الكربون الأكثر أهمية. نظراً لأن الفولاذ وحديد الزهر (المواد الأساسية في الإنشاءات والصناعات الهندسية) هي في الأساس سبائك حديد وكربون.

يبين الشكل (3- 3) منحنى الاتزان للحديد -كربون والمرفق كذلك في نهاية الكتاب .يبين المحور السيني نسبة الكربون في الحديد ، بينما يبين المحور العمودي درجة الحرارة. تزداد نسبة الكربون كلما ابتعدنا عن نقطة التقاء المحورين بحيث يعتبر الحديد عند الاقتراب من التقاء المحورين حديداً نقياً.



شكل (3- 3)

منحى الاتزان لنظام حديد - كربون

عند التسخين يحدث للحديد النقي (Pure - Iron) تغيران اثنان في التركيب البلوري قبل الانصهار. عند درجة حرارة الغرفة يسمى الحديد المستقر فيرّايت (Ferrite) أو حديد (α) وتكون بلوراته على شكل مكعب مركزي الجسم (BCC) وعند التسخين وعندما يصل إلى درجة حرارة (912°C) يكون حديد (α) قد تحول كاملاً إلى أوستنايت (Austenite) أو حديد (γ) وتصبح بلوراته (FCC) ويحافظ الاستنايت على هذا التركيب البلوري إلى أن يصل إلى درجة حرارة (1394°C) وعندها يعود إلى التركيب البلوري (F.C.C) واسمه فيرايت ويرمز له بالرمز(δ) الذي ينصهر في النهاية عند درجة حرارة (1538°C) هذه التغيرات واضحة على طول المحور العمودي للمنحنى.

يمكن التعبير عن العلاقة الطورية بدلالة نسبة الكربون المئوية وإذا أمعنا النظر إلى المنحنى نجد أنه يتكون من عدة مناطق أو مجالات طورية وكل منها يشغل إما طوراً واحداً أو مزيجاً من طورين. فالمنحنى (ABCD) يمثل الخط السائل الذي يعلوه طور سائل فقط يتألف من حديد مصهور وكربون مذاب.

ويمثل المنحنى (AEPGCH) خط الجامد. يتميز هذا المنحنى بأن جميع تراكيب حديد - كربون على اختلافها والتي تقع أسفل منه تكون جميعها جامدة. بينما تمثل المناطق التي تقع بين هذين المنحنيين مخلوطات من جامد سائل.

يكون كل من حديد (α) فيرايت (B.CC.) وحديد (γ) (F.C.C.) اوستنيت قادراً على إذابة كميات محددة من الكربون، وبالإمكان حديد (γ)إذابة الكربون بنسبة أعلى من حديد (α)، حيث يمكن أن تصل كمية الكربون في حديد (γ) إلى 2.11٪ (النقطة G) . بينما يمكن لحديد (α) أن يذيب كميات محدودة من الكربون (0.025% (النقطة L). وتنخفض ذوبانية الكربون في كل من حديد (α)، (γ) بانخفاض درجة الحرارة ويتضح هذا من المنحنى (GK) للاستنيت (γ)

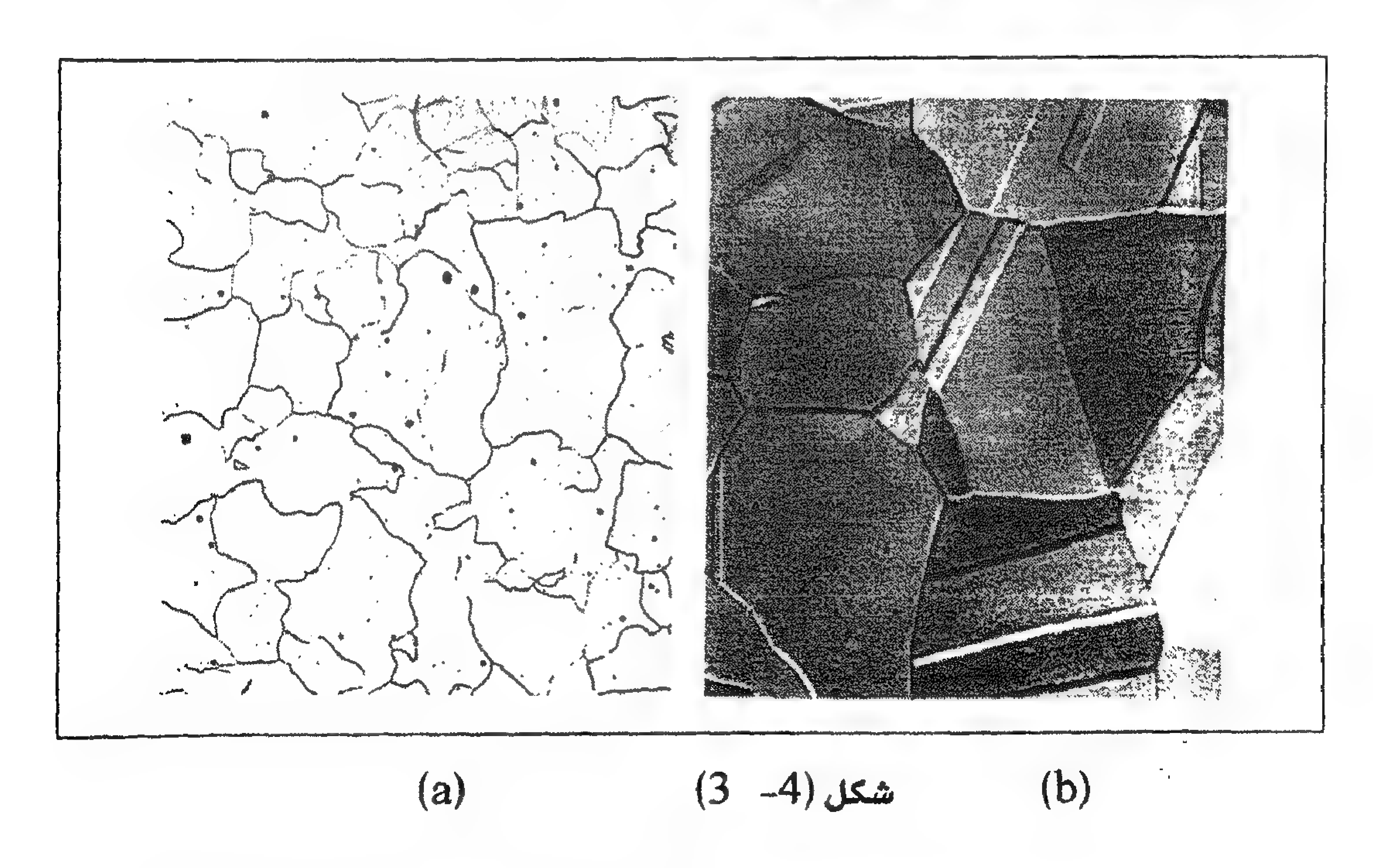
والمنحنى (LI) للزيت (α).

الطور الجامد الثالث الموجود على هذا المنحنى هو مركب (Fe_3C) الكيماوي ويحتوي على كربون بنسبة (6.69٪) وزناً ويسمى سمنتيت (Cementite) وهو صلب وهش، بينما يكون الفريت (α) لين نسبياً وقابل للطرق.

على الرغم من أن نسبة الكربون في حديد (α) ضئيلة إلا أنه ذو تأثير كبير على الخواص الميكانيكية للحديد.

ويبين الشكل (3-4 a) صورة مجهرية لحديد (α) الفريت.

لا يكون حديد (γ) الاستنيت المخلوط بالكربون فقط متوازناً عند درجات حرارة أدنى من (727°C) كما في شكل (3-4a).



(a) شكل (3 -4) (b)

وأعلى ذائبية للكربون في حديد (γ) هي 2.14٪ وزناً عند (1147°C). وهذه الذائبية تعادل حوالي 100 ضعف ذائبية الكربون في حديد (α) الفريت.

وتعتبر تغيرات الطور الخاصة بحديد (γ) مهمة جداً في عمليات المعالجة الحرارية للفولاذ.

ويبين الشكل (3-4b) صورة مجهرية لحديد (γ)..

لا يعتبر حديد الفريت (δ) مهماً نظراً لأنه يكون متزناً عند درجات الحرارة العالية فقط. ولا يتواجد عند درجات الحرارة المنخفضة.

يتشكل السمنتيت (Fe_3C) عندما يتم تجاوز ذائبية الكربون في حديد (α) عند درجات حرارة أدنى من(727°C) (عندما تكون المكونات ضمن منطقة ($\alpha + Fe_3C$) السمنتيت قاس جداً وهش ووجوده يزيد من متانة بعض أنواع الفولاذ.

تقع تحولات الطور (التحول من طور إلى آخر) مثل تحول السمنتيت إلى فريت عند درجات حرارة حرجة معينة، وهي ممثلة على المنحنى بالخطوط (GK, IK, LKM) ويرمز لهذه الخطوط بالرمز (A_1) ويطلق عليها اسم الخط الأسفل لدرجات الحرارة الحرجة ، بينما تسمى كل من (A_3) و (Acm) بالخط الأعلى لدرجات الحرارة الحرجة للتحولات العليا والسفلى التي تقع أثناء حالات الاتزان .

أما من الناحية العملية فمن النادر حدوث الاتزان، لذا يتم إزاحة خطوط درجات الحرارة الحرجة إلى مراكز أعلى عند التسخين، ومراكز أدنى عند التبريد، ويعتمد مقدار الإزاحة على معدل التسخين والتبريد.

يبين المنحنى وجود مدى تركيبي لكل من الفولاذ وحديد الصلب. حيث تعتبر التراكيب التي تحتوي على نسبة كربون تصل إلى 0.008٪ حديداً نقياً تجارياً، ويعتبر الحديد الذي تبدأ نسبة الكربون فيه من 0.008٪ إلى 2٪ فولاذاً والتراكيب التي تحتوي على نسبة كربون أكثر من 2٪ حديد صب. كما ويوجد للفولاذ تقسيم فرعي آخر.

إذا كانت التراكيب تحتوي على كربون بنسبة أقل من 0.77٪ فإن الاستنيت يبدأ بالتحول إلى فريت عند التبريد. وهذا يعني أنه سيطرد بعضاً من الكربون الذائب فيه (لأن الفريت لا يحتوي على كربون بنسبة عالية) لذا تزداد نسبة الكربون في الاستنيت المتبقي ويظهر هذا على امتداد الخط (A_3) حتى النقطة K.

وإذا كانت التراكيب يحتوي على كربون يتراوح بين 0.77٪ - 2.1٪ فإن السمنتيت ينفصل ويتغير تركيب الاوستنيت على امتداد الخط (GK) Acm حتى النقطة K ثانية وتسمى النقطة K نقطة اليوتيكتويد (eutectoid) يتحول الاستنيت إلى بيرليت (Pearlite) وهو مزيج من الفريت (α) والسمنتيت (γ). ويسمى هذا بالتحول اليوتيكتيدي الذي يتميز بتحلل المحلول الجامد إلى محلولين جامدين حسب التفاعل التالي:

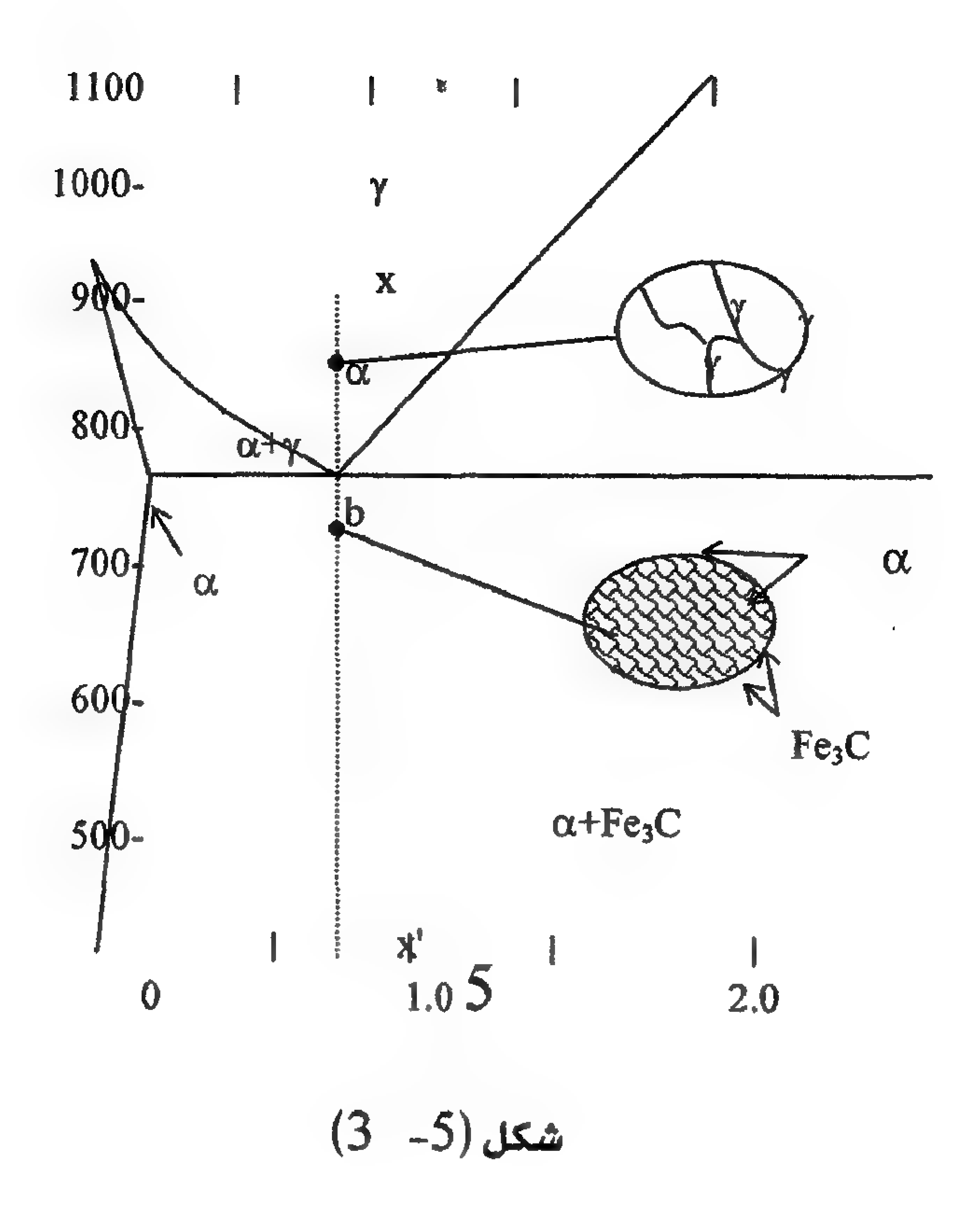
$$\text{سمنتيت } Fe_3C + (\alpha) \text{ فيريت } \underset{\text{تسخين}}{\overset{\text{تبريد}}{\rightleftarrows}} \gamma \text{ (أوستنيت)} \quad \text{...... (3-1)}$$

3-5 سبائك اليوتيكتويد الفولاذية (Eutectic Ferous Olloys):

يعتبر تفاعل اليوتيكتويد من أهم التحولات في السبائك الفولاذية. يمكن الاستنتاج من دراسة منحنى الحديد - كربون أنه يوجد ثلاثة أطوار في حالة اتزان عند نقطة اليوتيكتويد وهي الاستنيت، الفريت، والسمنتيت.

تعتبر التغيرات الطورية التي تحدث عند المرور من منطقة (γ) إلى منطقة ($\alpha + Fe_3C$) كما في شكل (5- 3) معقدة نوعاً ما.

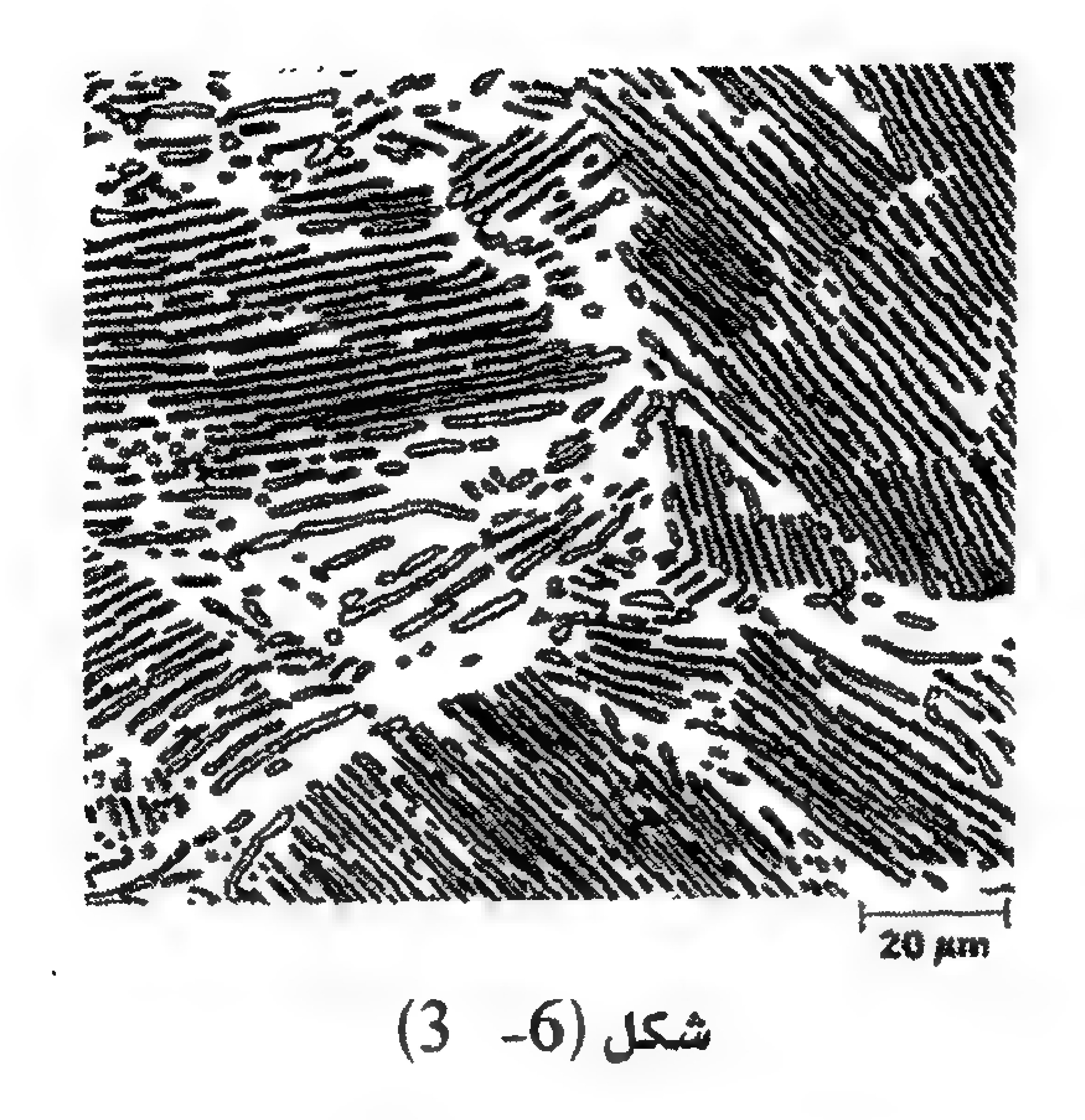
لنأخذ مثلاً سبيكة يوتيكتويد (0.67٪ كربون وزناً). فعندما يتم تبريدها إلى درجة حرارة ضمن منطقة طور (γ)، لنقل (800°C) مثلاً. أي ابتداءاً من النقطة (a) في الشكل (5- 3) والتحرك إلى الأسفل إلى النقطة (ط) على طول الخط العمودي (x-x'). تتكون السبيكة كاملة أساساً من طور الاستنيت (60.76° كربون).



شكل (5- 3)

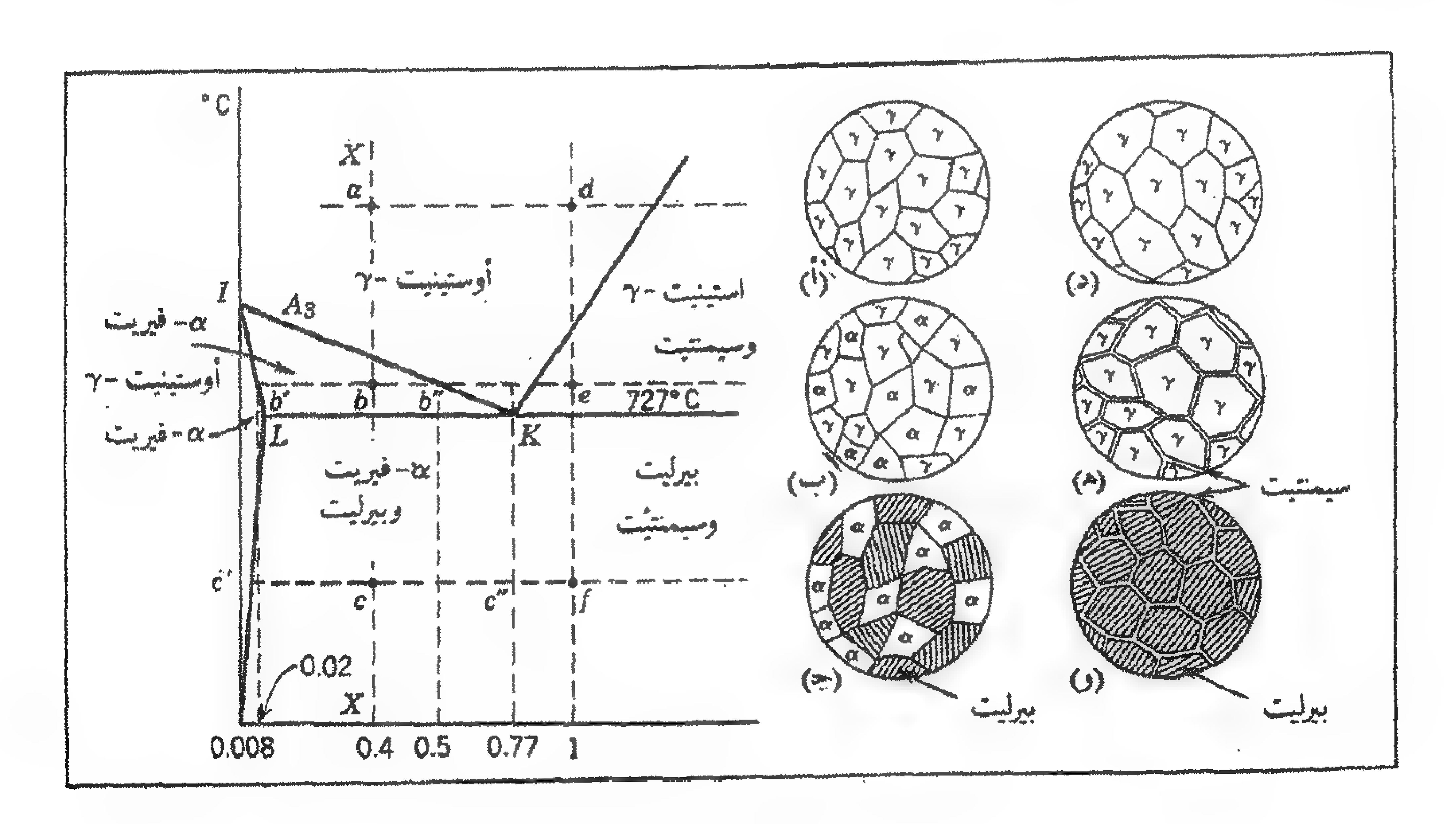
عنـد التبريـد وكمـا يفيـد الـشكل (5- 3) لـن يحـدث أي تغـيير حتـى تنخفض درجة حرارة اليوتكتويد إلى (727°C) وعندما تنخفض درجة الحرارة عن 727 يبدأ تحول الاستنيت حسب المعادلة (1- 3).

يتـألف التركيب المجهري لهذا اليوتكتويـد الـذي يبرد ببطـوء دون درجـة حرارة اليوتكتويد مـن طبقـات تبادليـة مـن الطـورين ($\alpha+Fe_3C$) الـذي يتـشكل بعـد التحـول. ويمثـل الـشكل (3-4b) هـذا التركيـب الـذي يـسمى بيرليـت (Perlite). المبين في الـشكل (6- 3) الـذي يتـألف مـن حديـد (α) (الطـور خفيـف التركيـز) و (Fe_3C) الأشكال والطبقات الابرية الداكنة.



شكل (6- 3)

لنأخذ فولاذاً يحتوي 0.4٪ كربون والممثل جزئياً على منحنى حديد-كربون شكل (7- 3) بالخط (X-X').



شكل (7- 3)

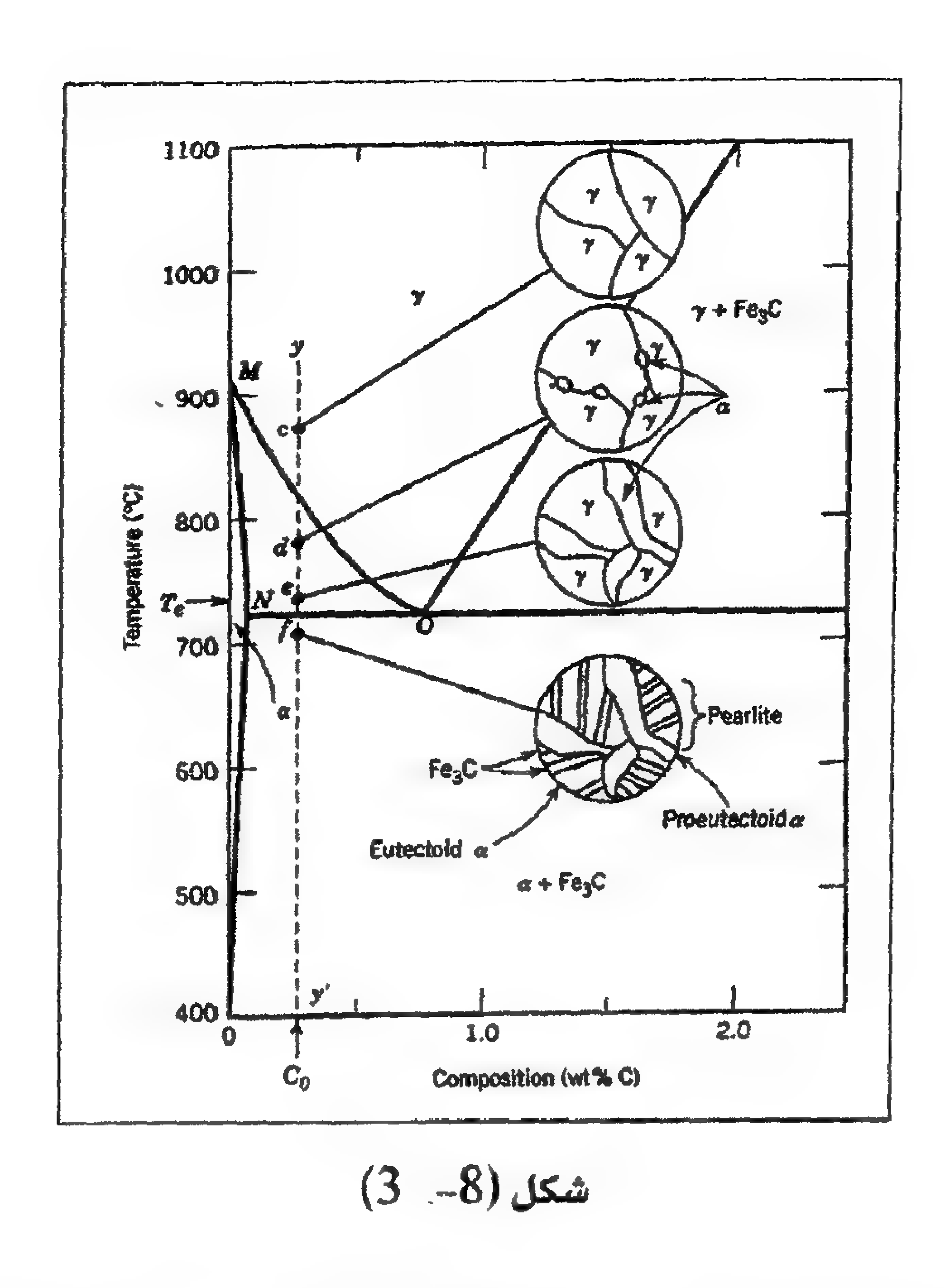
تراكيب دقيقة لفولاذ كربوني تكونت عند التبريد البطيء

عندما يبدأ التبريد من منطقة السائل على امتداد الخط (x-x') يبدأ التجمد على خط السائل ويكتمل على خط الجامد (Ah) ومع استمرار التبريد ، لا تحدث التغيرات إلا عند الوصول إلى النقطة (A_3) حيث يبدأ ترسيب الفريت من الطور الجامد للاستنيت، ويؤدي استمرار التبريد إلى زيادة كمية الفريت ونقصان الاستنيت الذي يتغير تركيبه على امتداد الخط (IK)، كما أن تركيب الفريت يتغير على امتداد الخط (IL) حتى تصل نسبة الكربون فيه إلى 0.025٪ عند النقطة (L).

وعند درجة حرارة اليوتكتويد (727°C) بتحول الاستنيت إلى بيرليت (فريت بنسبة 88.8٪ وسمنتيت بنسبة 11.2٪).

من هنا يتضح أن الفولاذ ذو التركيب اليوتكتيدي (0.77٪ كربون) يتألف من بيرليت فقط بينما يتكون الفولاذ الذي تزيد نسبة الكربون فيه عن 0.77٪ من بيرليت وسمنتيت.

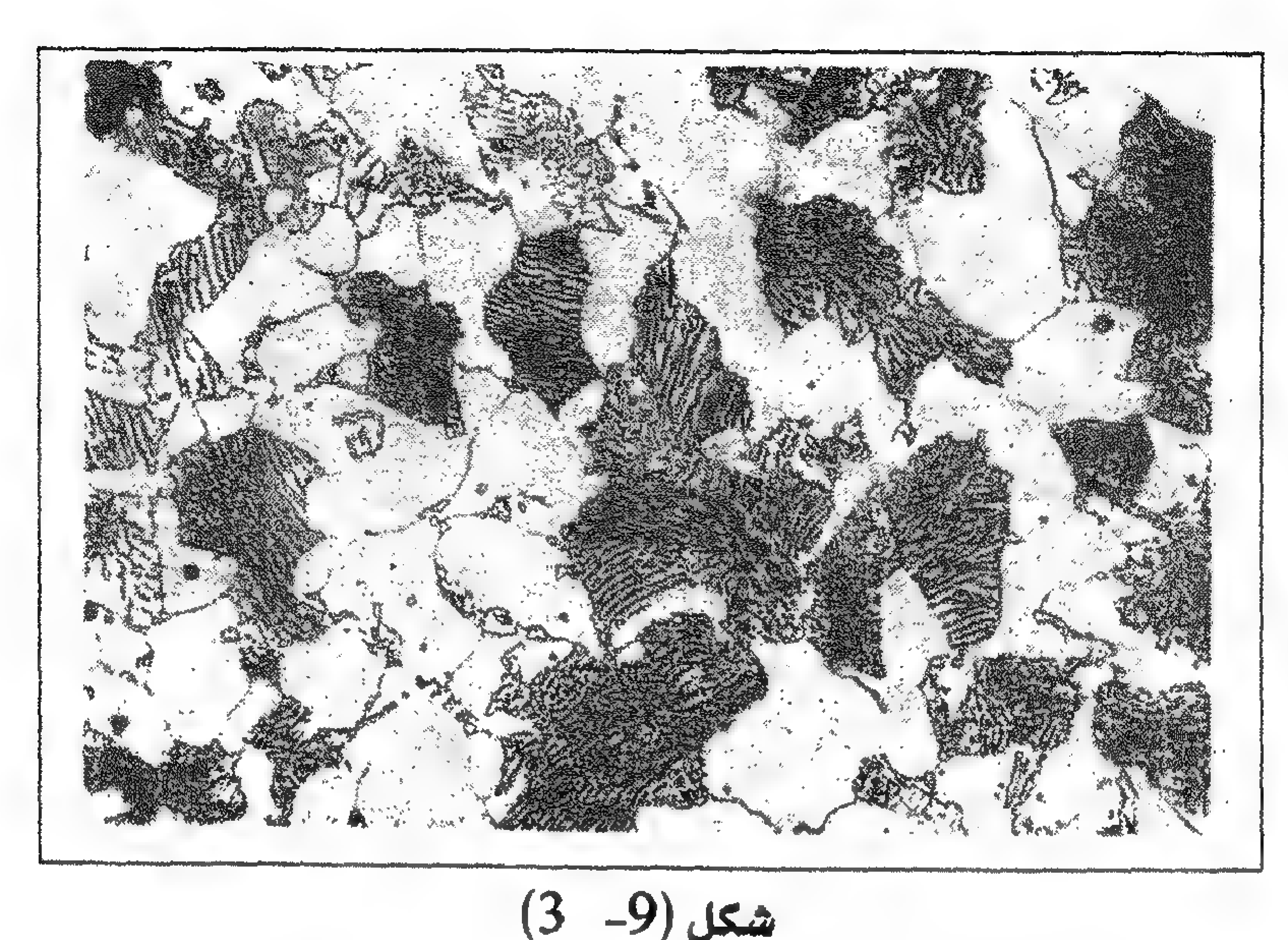
أما إذا كانت نسبة الكربون تقل عن 0.4٪ كما في الشكل (8- 3). ولنأخذ المحلول عند النقطة (C_0)، وتسمى هذه السبيكة هايبويوتكتويد (hypoeutectoide) أي ما دون اليوتكتويد.



شكل (8- 3)

يمكن تمثيل تبريد سبيكة كهذه بالخط العمودي ('yy). وعند حوالي (875°C) (النقطة C) سيكون التركيب المجهري لهذه السبيكة حديد (γ) بصورة تامة وعند التبريد إلى النقطة (d) (حوالي 775°C) وهذا ضمن منطقة (α + γ). ويتواجد هذان الطوران بصورة مشتركة مع بعضها البعض كما في الشكل - كما ويلاحظ أن غالبية حبيبات (α) الصغيرة الحجم تتشكل على طول حدود حبيبات (γ) . ومع الاستمرار بالتبريد ضمن منطقة (γ + α) يستمر التغير في طور الفريت على طول الخط (MN) لتزداد نسبة الكربون بشكل بسيط. وفي المقابل يكون التغير في تركيب الاستنيت أكثر وضوحاً أثناء التبريد وذلك على طول الخط (MO). مع استمرار التبريد من النقطة (d) إلى النقطة (e) ولا تزال ضمن منطقة (γ + α) وأعلى من منطقة اليوتكتويد بقليل ستزداد نسبة حديد (α) وتنمو حبيبات حديد (α) لتصبح أكبر وعند درجات حرارة أدنى من نقطة

اليوتكتويد (النقطة F) يتحول كامل حديد (γ) إلى بيرليت. كما يظهر من الدائرة السفلى في الشكل (8- 3) ويبين الشكل (9- 3) صورة مجهرية تظهر البيرليت (المناطق الداكنة) ويحيط بها حديد الفريت (α).



شكل (9- 3)

البيرليت (المواقع الداكنة) يحيط بها حديد α

3-6 تأثير المعادن المضافة على سلوك السبيكة

Influance of Other alloying elements

يؤدي إضافة معادن أخرى إلى السبيكة مثل (كروميوم Cr نيكل Ni و تيتانيوم Ti .... الخ) إلى تغيرات كبيرة في منحنى الاتزان للحديد والكربيد (Fe_3C). مدى التغيير في مواضع حدود الأطوار وأشكال مناطق الأطوار على نوع المعدن المضاف وكميته. (أي تركيزه في السبيكة). وأحد هذه التغيرات الهامة هو تغير موضع اليوتكتويد بالنسبة إلى درجة الحرارة ونسبة الكربون وهذه التغيرات مبينة في الشكل (10- 3) والشكل (11- 3) وترسم هذه المنحنيات درجة حرارة اليوتكتويد وتركيبة اليوتكتويد (نسبة الكربون) بدلالة تركيز مجموعة من المعادن الأخرى. وهكذا لا تغير المعادن المضافة درجة حرارة اليوتكتويد فقط بل تغير

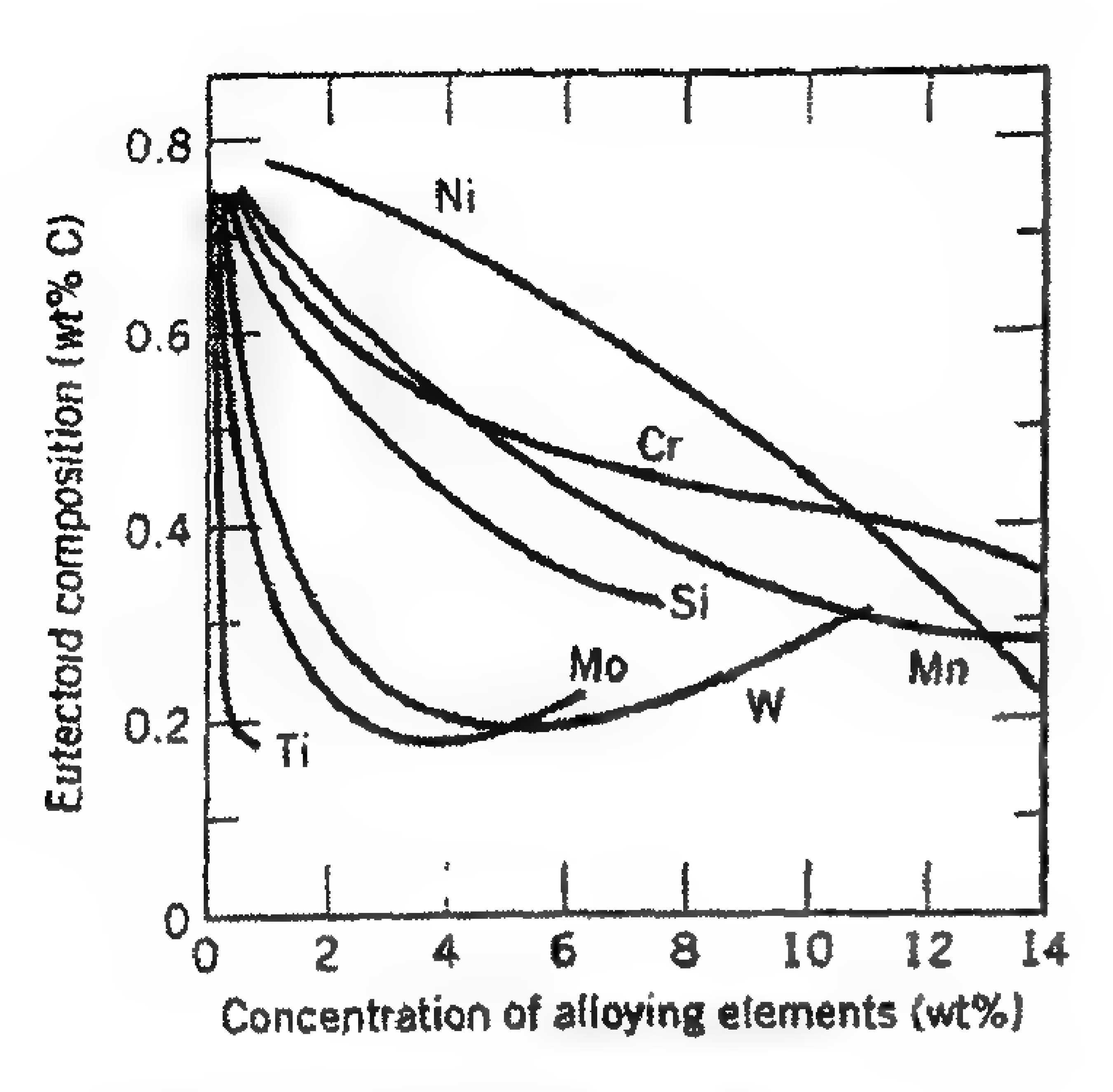
كذلك نسبة تكوّن البرليت وطور ما قبل التوتكتويد. (Preutecoide) المتشكل. وبشكل عام تضاف المعادن إلى الفولاذ لتحسين صفاته من مقاومة الصدأ مثلاً وقابليته للمعالجة الحرارية وزيادة المتانة وغيرها.

Eutectoid temperature (°C)

Concentration alloying elements wt%)

تركيز العناصر المضافة

شكل (10- 3)



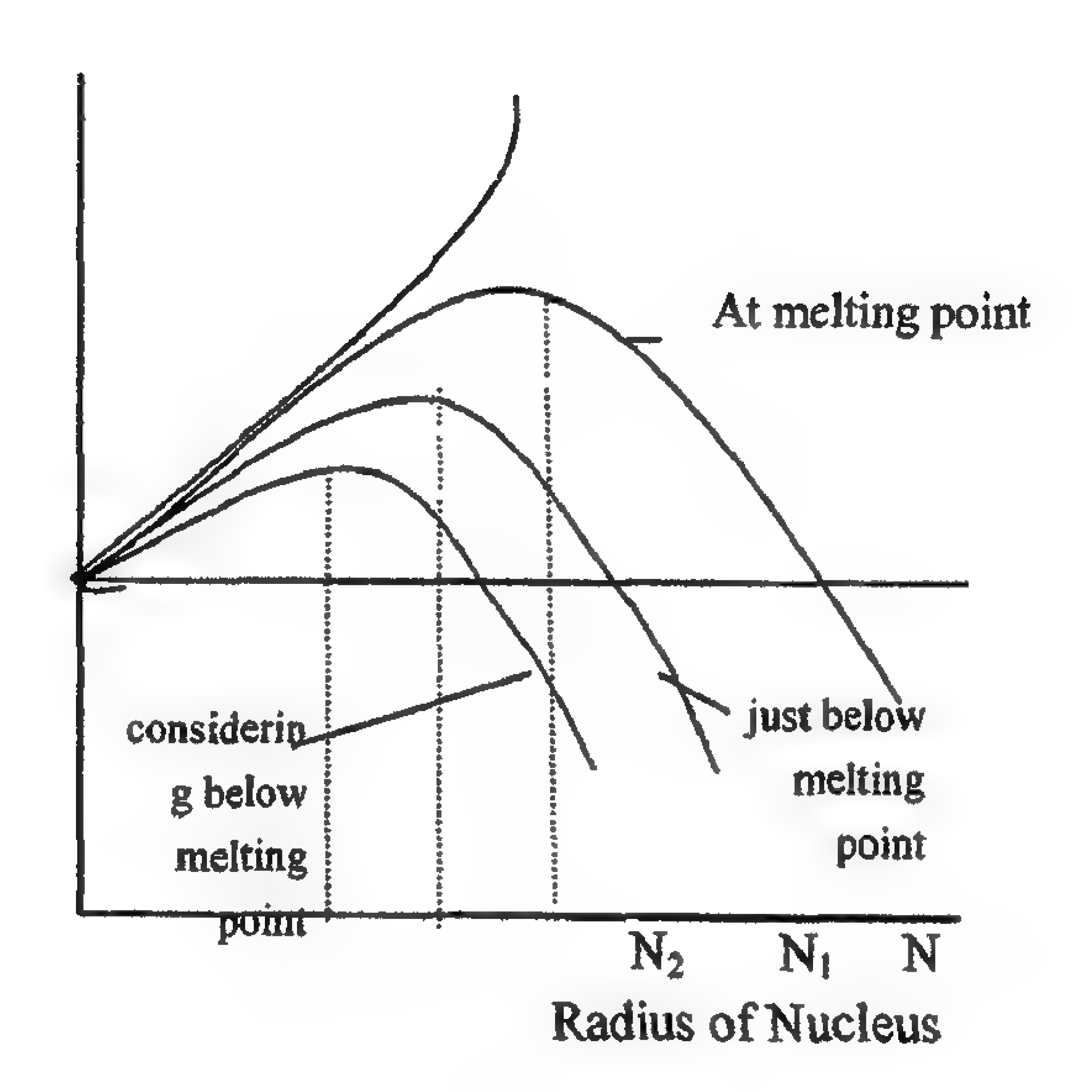
تركيز العناصر المضافة

شكل (11- 3)

3-7 التصلب (Solidification):

أثناء عملية التصلب يكوّن الفلز بلورات تتسم بخواص ذلك الفلز وهذه البلورات تتركب من صفوف من الذرات مرتبة هندسياً في الثلاثة أبعاد وكل ذرة لها عدد محدود من الجارات القريبات. والآن إذا عدنا إلى الحالة السائلة (المنصهرة) نجد أن الذرات في هذه الحالة قد تكون قريبة من بعضها البعض قد يتفق في بعض الأحيان أن تواجد ذرة في منطقة معينة وتكون محاطة بالعدد الملائم من الذرات ليكون وحدة البناء الأولى. ولكن طالما أن كل ذرة طليقة الحركة فإن ذلك لا يؤدي إلى تكون وحدة البناء الأولى وبالتالي لن تنتظم المادة في ترتيب بلوري وبالتالي تعود من جديد إلى الحالة السائلة. ومع التبريد فإن طاقة الحركة للذرات تتناقص وتقل سرعتها ومن ثم تتهيأ فرصة أكبر لتكون وحدة البناء الأولى إذا ما توافر حول ذرة ما العدد الكافي من الذرات اللازمة لتكوين تلك الوحدة. وإذا ما تكونت هذه

النواة الأولى لعملية التبلور فإنها تأخذ بعد ذلك في النمو في الأبعاد الثلاثة. على أن العدد الكافي والمناسب من الذرات واللازم لبدء عملية تكوين النواة الأولى غير معروفة على وجه التحديد. إلا أنه يمكن القول بأن عدد الذرات التي تكون النواة الأولى للتصلب تعتمد على عاملين أساسين أولهما التناقص في الطاقة الناشىء من إحلال الصلب محل السائل والعامل الثاني التزايد في الطاقة والناشىء من تولد الشد السطحي عند السطح اللازم لحدوث عملية التصلب موضح في الشكل (12- 3).



شكل (12- 3)
التغير في الطاقة الحرة بقطر النواة لتكوين الشبكية

وفي هذا الرسم نرى أن التغير في طاقة المحلول قد رسم كدالة لقطر نواة التبلور وإذا ما تكونت النواة فإن ذلك يؤدي إلى زيادة في الطاقة نتيجة الشد السطحي فإذا كان قطر هذه النواة أكبر مما هو موضح عند النهاية العظمى للمنحنى المعطي بشكل (12- 3) فإن ذلك يؤدي إلى استمرار هذه النواة في النمو لأنه في هذه الحالة تكون الزيادة في الطاقة نتيجة الشد السطحي أقل من التناقص في الطاقة الناتج عن عملية التصلب وتكون المحصلة النهائية في اتجاه الناقص في الطاقة وهذا يساعد على نمو البلورة. أما إذا كان ذلك القطر أقل من القطر

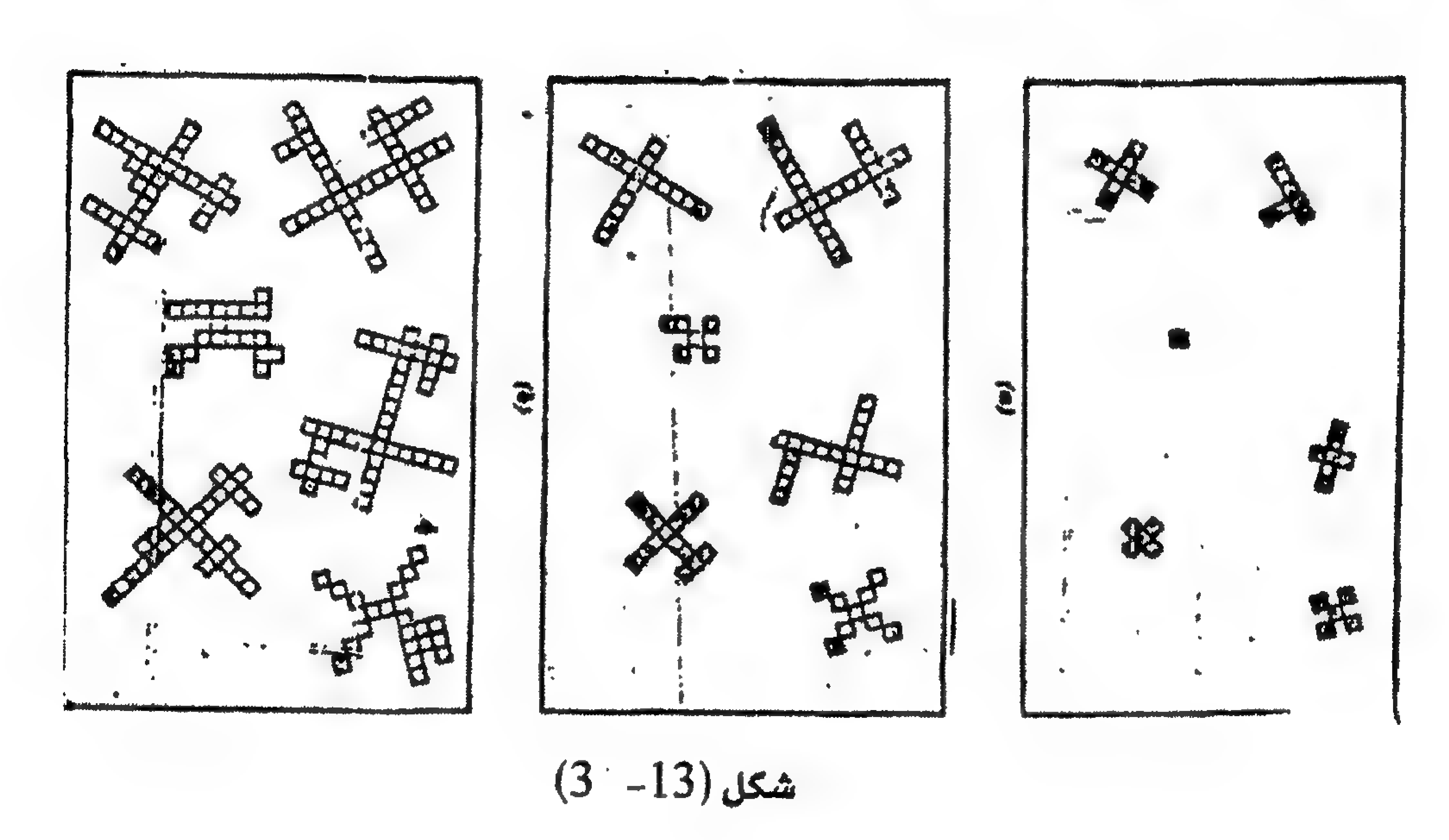
الخاص بالنهاية العظمى على المنحنى المذكور أعلاه فإن الزيادة في الطاقة نتيجة تشوه الشد السطحي تكون أكبر من الفقدان في الطاقة نتيجة عملية التصلب وتكون المحصلة النهائية للعملية هي حدوث زيادة في الطاقة مما يؤدي إلى ذوبان هذه النواة مرة أخرى. والآن إذا كانت درجة الحرارة أقل بقليل من درجة الانصهار فإن قطر نواة التبلور يتوقع أن يكون صغيراً وإذا كان حجم النواة على الأقل مساوياً للقطر (N_1) الموضح على نفس الرسم السابق فإن هذه النواة يتوقع لها النمو. أما إذا كانت درجة الحرارة أقل بكثير من درجة الانصهار فإن حجم النواة اللازمة للتبلور يمكن أن يكون صغيراً جداً هذه المرة. ومما سبق يتضح أنه كلما قربنا من نقطة الانصهار فإن حجم النواة اللازم لاستمرار عملية التبلور يكون أكبر ويعني ذلك أنه عند درجة الانصهار يكون حجم النواة اللازم لبدء عملية التبلور كبير جداً ومن الواضح بأن ذلك لن يحدث أبداً لأن مثل تلك النواة حتى لو تكونت عند هذه الدرجة القريبة جداً من درجة الانصهار فإنها سرعان ما تذوب مرة أخرى وهذا يعني أن عملية التصلب عند درجة الانصهار الحقيقية لا تحدث مطلقاً.

وفي البناء البلوري والذي يتخذ شكل المكعب العادي بمستوياته المتعامدة على بعضها البعض في الأبعاد الثلاثة نجد أن نمو التبلور يسري في الاتجاه الذي يؤدي إلى تكون ما يسمى بالهياكل الشجرية (Dendritic) وهذه التراكيب أو الهياكل الشجرية لا تلاحظ عادة في حالة الفلزات النقية إلا أنها تظهر بكثرة في حالة السبائك التي تتألف من مكونات غير تامة الامتزاج .

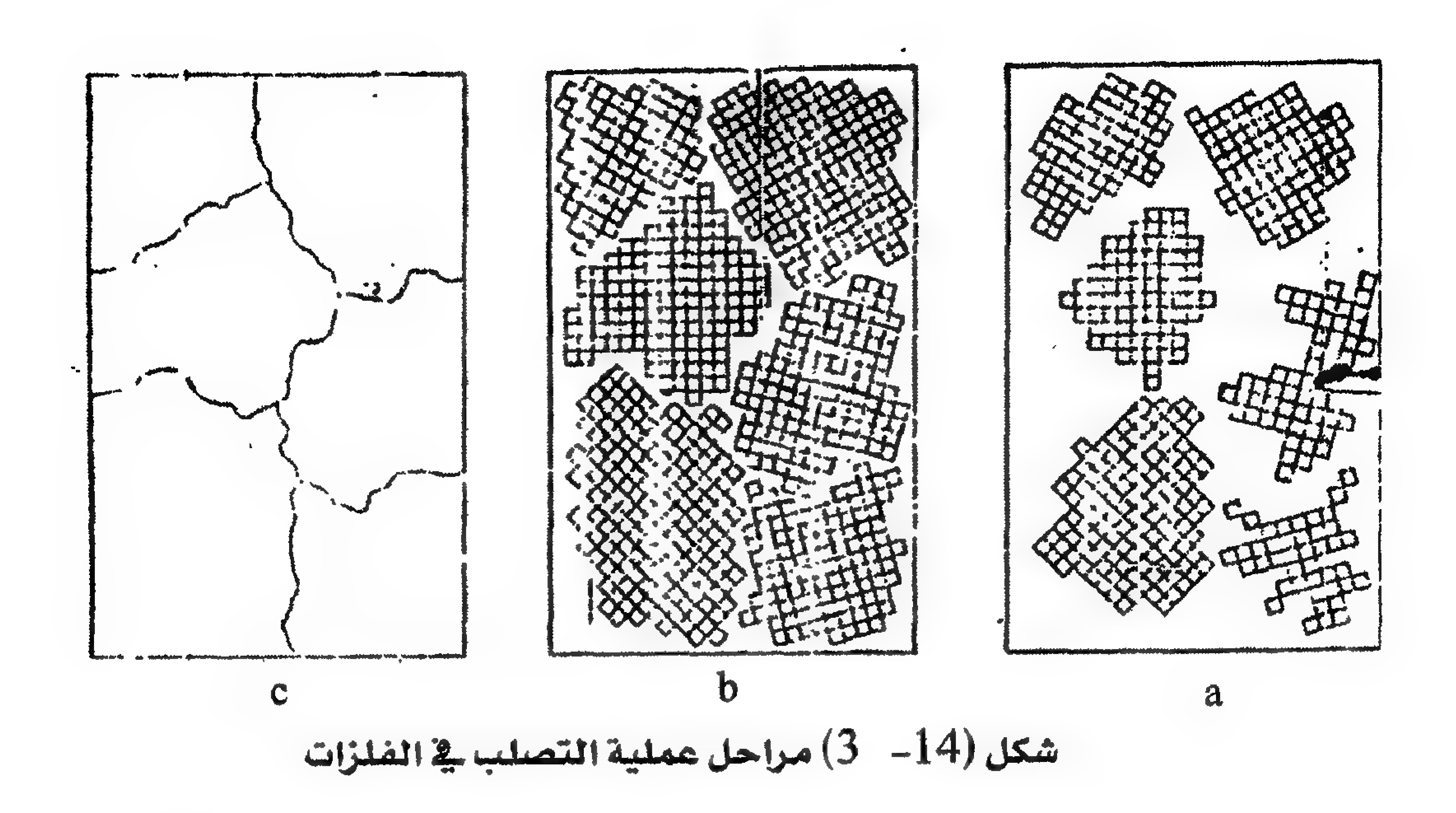
وعندما يبرد منصهر فلز إلى درجة حرارية مساوية لدرجة انجماده أو أقل منها بقليل فإننا نجد أن مراكز التبلور قد أخذت في التكون في مواضع مختلفة عبر السائل المنصهر. هذه المراكز تأخذ بعد ذلك في النمو عن طريق التجمع لمزيد من الوحدات البنائية حول مركز التبلور. وهذا النمو يستمر في التزايد بطبيعة الحال على حساب كمية المنصهر التي تأخذ في التناقص نتيجة لذلك.

ويجب أن يكون مفهوماً بأن عملية النمو لمراكز التبلور لا يتخذ اتجاهاً واحداً ولكن كل مركز ينمو في اتجاه محور البلورة الخاص به ومن ثم فإننا نجد كنتيجة لذلك حدوث تعارض في هذه الاتجاهات مما يؤدي إلى تكوين حبيبات ذات أشكال غير منظمة ويراعي أن حجم وترتيب هذه الحبيبات يتأثر بمعدل التبريد. وكل من هذه الحبيبات هي في الواقع بلورة منفردة إلا أنها لم تتخذ شكلها البلوري المتماثل هندسياً نظراً لإعاقة نموها في الاتجاهات المختلفة مع تطور نمو باقي الحبيبات الأخرى ولتعوق هذا النمو بسبب جدران الوعاء الحاوي لها.

ويوجد في شكل (13- 3) والشكل (14- 3) توضيحات بالرسم لتطوير عملية التصلب سالفة الذكر.



شكل (13- 3)

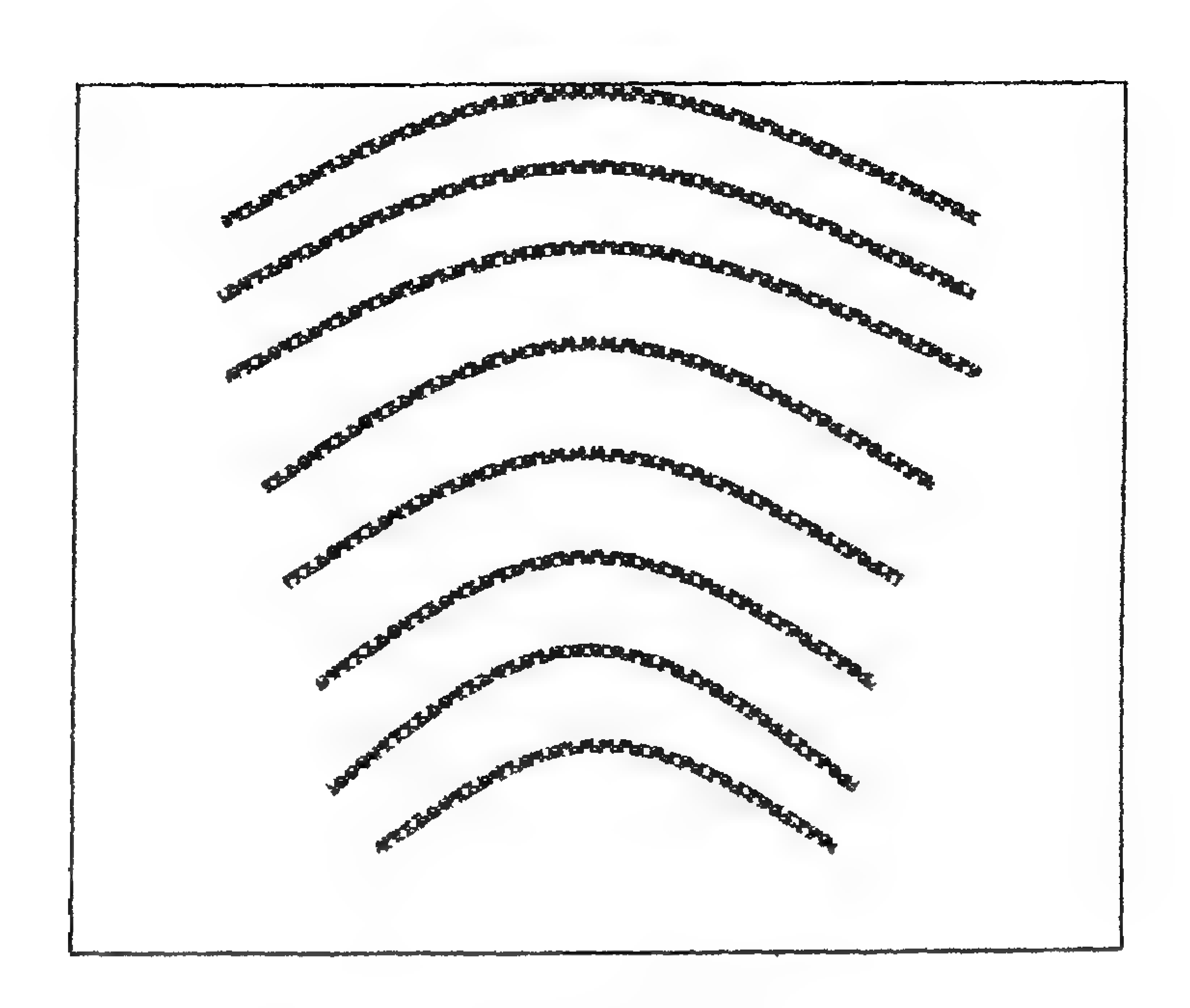


شكل (14- 3) مراحل عملية التصلب في الفلزات

وتمثل المربعات في الشكل السابق الهياكل الشبكية (Space Lattice) فنرى في الشكل (a) أن عملية التبلور قد بدأت في ستة مراكز أو ستة أنوية. وباستمرار عملية البلورة فإن مراكز جديدة تأخذ في الظهور وبهياكل شبكية ذات اتجاهات مختلفة، كما نجد أن البلورات الصغيرة تختفي عند ملامستها للبلورات الكبيرة شريطة أن يكون ترتيبها الذري بنفس الاتجاه. والمراحل المتعاقبة لعملية التبلور موضحة بنفس الشكل في الأجزاء (f,e,d,c,b) وفي المراحل الأخيرة من عملية التبلور نجد أن البلورات تلتقي مكونة سطوحاً فاصلة بين بعضها البعض، وعند هذه السطوح الفاصلة للحبيبات تكون الذرات الباقية دون تصلب خاضعة لتأثير اتجاهين مختلفين من الهياكل الشبكية وكل منها يحاول أن يضمها إلى بناءه لذا فهذه الذرات لا تأخذ اتجاه أي منها ولكن تتخذ مواضع متوسطة بينهما هذه المواضع لا تشترط وجود انتظام خاص لهذه الذرات مثل الموجودة داخل الحبيبات نفسها. ولذلك نجد أن هذه المناطق المتواجدة عند السطوح الفاصلة تكون تقريباً عديمة الانتظام وعدم الانتظام هذا ناشيء من تداخل الهياكل الحيزية مع بعضها البعض كما أوضحنا سالفا وتسمى هذه المناطق بحدود الحبيبات (Grain boundary) يراعي أن الذرات عند حدود الحبيبات تكون أقل

انتظاماً من تلك المتواجدة في الحبيبات ويكون وضعها النسبي غير متزن تماماً كتلك الموجودة داخل الحبيبة ومن ثم يكون محتواها الطاقي أعلى من نظيرتها المتواجدة في الحبيبات ولذلك نجد أنها أشد نشاطاً في التفاعلات الكيمياوية. وعلى ذلك إذا ما تعرض سطح فلزي لفعل حامض فإننا نجد أن أول ما يشترك في التفاعل مع هذا الحامض هي تلك الذرات المتواجدة بحدود الحبيبات والشكل (15- 3) عبارة عن رسم تخطيطي يجمع حدود الحبيبات كما تظهر في حالة فلز من المجموعة ذات البناء البلوري المكعبي ويلاحظ هذا الشكل التخطيطي أن محاور الحبيبة الواحدة موازية لبعضها بينما تنحرف عن محاور الحبيبات المجاورة.

وعند السطح الفاصل بين هاتين البلورتين نجد أن المسافات البينية الذرية غير كاملة (أي لا تساوي المسافات الذرية البينية في جسم البلورة) وعليه لا تكون الذرات في مواضع مستقرة ولذلك فإنها تكون في أعلى مستوى طاقي ممكن (وهو ما يمثل حالة الاستقرار) ونظراً لتواجد كثافة ذرية منخفضة عند حدود الحبيبات فإن ذلك يجعل الفرصة سانحة لذرات الشوائب أن تتجمع وتستقر في هذه الحدود. ويعتمد حجم الحبيبات المتكونة على درجة حرارة التكوين أيضاً على معدل التبريد خلال عملية الانجماد وكذلك على طبيعة الفلز. فمعدل التبريد البطيء ابتداء من درجة الانجماد يؤدي إلى تكون حبيبات كبيرة الحجم جداً بينما عندما يكون معدل التبريد سريعاً فإن ذلك يؤدي إلى تكون حبيبات صغيرة الحجم والسبب في ذلك أن معدل التبريد السريع يؤدي إلى تكون عدد كبير جداً من أنوية التبلور كما يؤدي أيضاً إلى نقص معدل نمو هذه الأنوية بينما نجد أنه عندما يكون معدل التبريد بطيئاً فإن عدد الأنوية المتكونة هذه المرة يكون قليلاً وبالتالي يؤدي إلى نمو هذه الأنوية أكثر من الحالة السابقة أي إلى تكون حبيبات كبيرة. وعندما يكون البناء البلوري متكوناً من العديد من الحبيبات كما هو الحال في السبائك التجارية فإن البناء في هذه الحالة يسمى بناء متعدد البلورية (Polycrystalline).



شكل (15- 3) حدود الحبيبية

3-8 الذائبية وتصنيف مخططات الطور:

تعتمد خواص الكثير من السبائك على خواص الأطوار وعلى طريقة تكوينها. مما يقتضي وجود طريقة ما لتعيين العلاقات المتداخلة بين الأطوار، وهذا كله يمكن توضيحه عن طريق مخططات الاتزان التي تعرف بأنها تلك المخططات التي توضح العلاقة بين تركيب السبائك ودرجة الحرارة في حالة الاتزان. ويمكن تصنيف مخططات الاتزان وفقاً لطبيعة المكونات في كل من الحالة السائلة والحالة الصلبة كما يلي:

1. مكونات تامة الذوبان في الحالة السائلة. وهذه بدورها تقسم إلى :
   أ. مكونات تامة الذوبان في الحالة الصلبة.
   ب. مكونات محدودة الذوبان في الحالة الصلبة مع أو بدون تفاعل يوتكتيدي.

ج. مكونات عديمة الذوبان في الحالة الصلبة.

2. **مكونات محدودة الذوبان في الحالة السائلة وتكون:**

أ. محدودة الذوبان في الحالة الصلبة.

ب. عديمة الذوبان في الحالة الصلبة.

3. **مكونات عديمة الذوبان في الحالة السائلة وهذه تكون عديمة الذوبان في الحالة الصلبة كذلك.**

منحنيات التوازن الحراري لمعدنين قابلين للذوبان بأي نسبة في الحالة السائلة وعديمة الذوبان في الحالة الصلبة:

تعتبر مثل هذه الحالات نادرة لأن هناك بصفة شبه دائمة درجة صغيرة من الذوبان في الحالة الصلبة لمعدن في معدن آخر، ومن أحد الأمثلة القليلة التي يكون فيها الذوبان في الحالة الصلبة عديماً هي نظام السبيكة المكونة من معدني الكادميوم والبزموث، ومعدن البزموث من المعادن الثقيلة وله بريق بلون وردي ويجب تمييزه عن البزموث الطبي الذي يستخدم لإزالة عسر الهضم، وهذا البزموث الطبي هو في الحقيقة كربونات البزموث التي تكون على هيئة مسحوق.

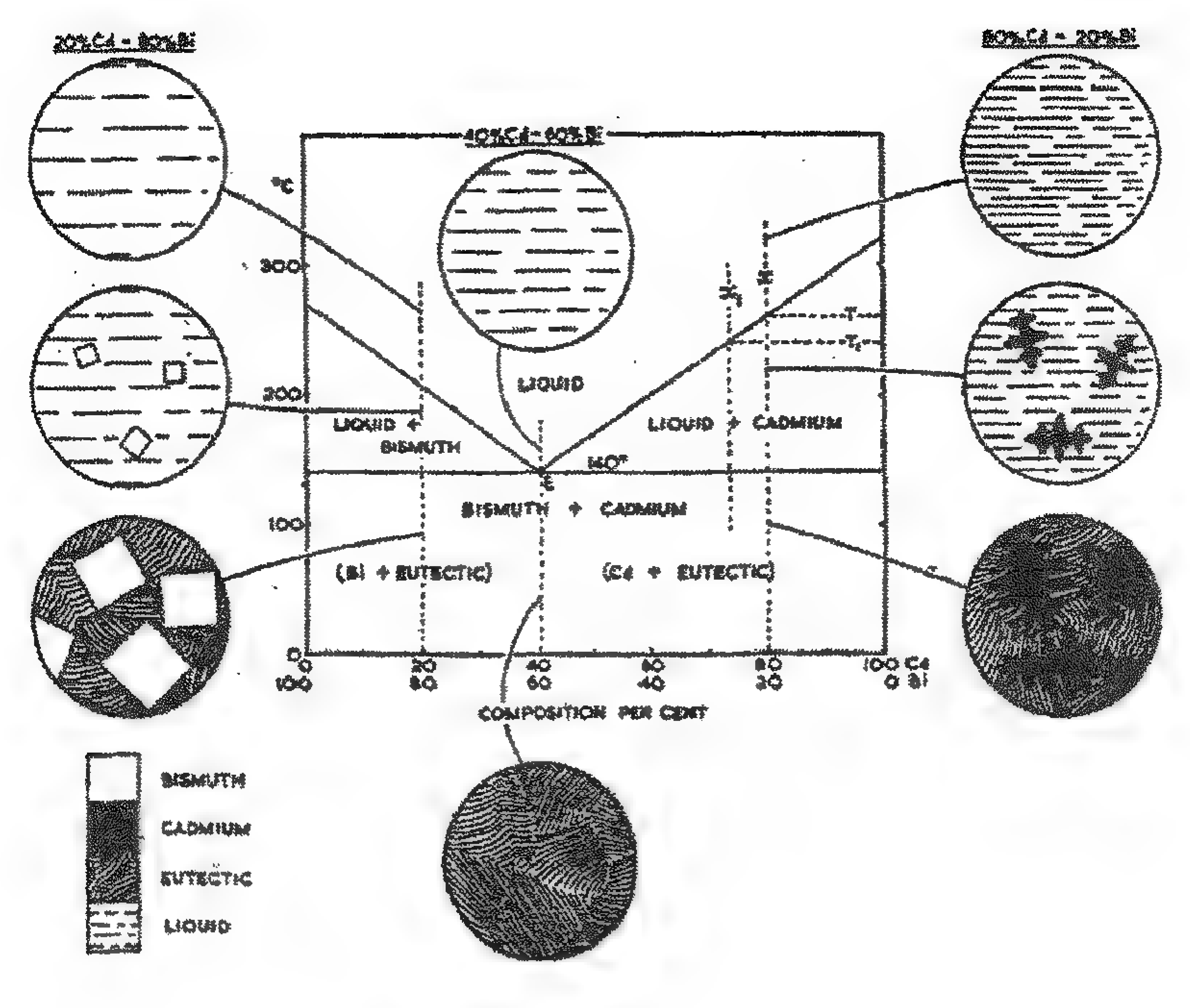
ويبين شكل 16- 3 منحنى النوازن الحراري بين البزموث والكادميوم.

لنبدأ من تتبع تجمد سبيكة بتركيب × التي تحتوي على حوالي 80٪ كادميوم و 20٪ بزموث، فعندما تهبط درجة الحرارة إلى T فإن نواة بلورية من الكادميوم النقي تبدأ في التكوين (يلاحظ أن خط درجة الحرارة الأفقي T يقطع خط السيولة عند التركيب الكيميائي المختار x_1 وأن حد الصنف الآخر هو 100 كادميوم)، ونظراً لأن الكاديوم يترسب فأن ذلك يترتب عليه زيادة بنسبة البزموث في السائل المتبقي، لذلك فإن التركيب الكيميائي للسائل يتحرك جهة اليسار نحو نقطة 'x على سبيل المثال كما يتضح من المنحنى هنا نجد أن عملية ترسيب

الكاديوم تتوقف حتى تهبط درجة الحرارة إلى T1،وعندما يحدث ذلك تترسب كمية أكبر من الكادميوم وتبدأ الإنباتات في النمو من الذرات التي قد تكونت بالفعل، وبينما تستمر عملية نمو انباتات الكادميوم من ناحية فإن اغتناء السائل المتبقي بالبزموث يتم من ناحية أخرى وذلك حتى تهبط درجة الحرارة إلى 140° م، ويحتوي السائل عندئذ على 40٪ كاديوم 60٪ بزموث أي أننا نصل إلى نقطة البوتكتيكE.

وعند هذه النقطة يكون المعدنان في حالة توازن مع السائل إلا أنه بسبب فعالية عملية التبلور فإن التركيب الكيميائي ينحرف قليلاً بعيداً عن النقطة E مما ينتج عنه ترسب بعض الكاديوم، وللمحافظة على حالة التوازن فإن انحرافاً عكسياً في التركيب الكيميائي يحدث عبر نقطة البوتكتيك بترسيب طبقة من البزموث، وبهذه الطريقة نجد أن التركيب الكيميائي للسائل يتذبذب حول نقطة E بترسيب طبقات متبادلة من الكاديوم والبزموث بينما تظل درجة الحرارة عند 140° م حتى يتجمد السائل المتبقي.

وبذلك تتكون البنية النهائية من بلورات ابتدائية من الكاديموم التي تكونت بين درجة حرارة T، 140° م والبوتيكتيك الذي يتكون من طبقات متبادلة من الكادميوم والبزموث التي تكونت عند 140° م.



شكل 16- 3

منحنى التوازن الحراري للبزموث والكادميوم

وإذا كان السائل الأصلي محتوياً على نسبة من الكادميوم أقل من 40٪ فإن بلورات من البزموث النقي سوف تتكون أولاً مؤدية بذلك إلى تحريك التركيب الكيميائي للسائل المتبقي على جهة اليمين حتى تصل إلى نقطة E كما سبق ويكون تركيب السائل النهائي محتوياً على 40٪ كادميوم، 60٪ بزموث، ويتجمد هذا السائل المتبقي على هيئة يوتيكتيك بنفس الطريقة السابقة.

وإذا احتوى السائل الأصلي بالضبط على 40٪ كادميوم، 60٪ بزموث فإنه لا يحدث أي تجمد حتى تهبط درجة الحرارة إلى 140°م وعندئذ تكون البنية الداخلية عبارة عن يوتيكتيك بالطريقة السابق شرحها.

وفي جميع الحالات الثلاث سابقة الذكر فإن الجزء اليوتكتيكي من البنية الداخلية يكون بتركيب ثابت يحتوي دائماً على 40٪ كاديوم، 60٪ بزموث، وأي انحراف لأي من الجهتين في التركيب الكيميائي الكلي للسبيكة يتم معادلته

بترسيب نسب ملائمة سواء من الكادميوم أو البزموث الابتدائي والتي تزيد عن تركيب اليوتيكتيك، ومن المهم هنا معرفة أنه لا يوجد أية قابلية للذوبان في الحالة الصلبة بأي طريقة من الطرق في البنية النهائية أياً كان التركيب للسبيكة، ويمكن بواسطة الميكروسكوب التمييز بين المعدنين النقيين الكادميوم والبزموث حيث يتواجدان على هيئة مكونات منقطعة في البنية المجهرية، أو بمعنى آخر أن هذه الحالة هي حالة عدم القابلية للذوبان نهائياً في الحالة الصلبة.

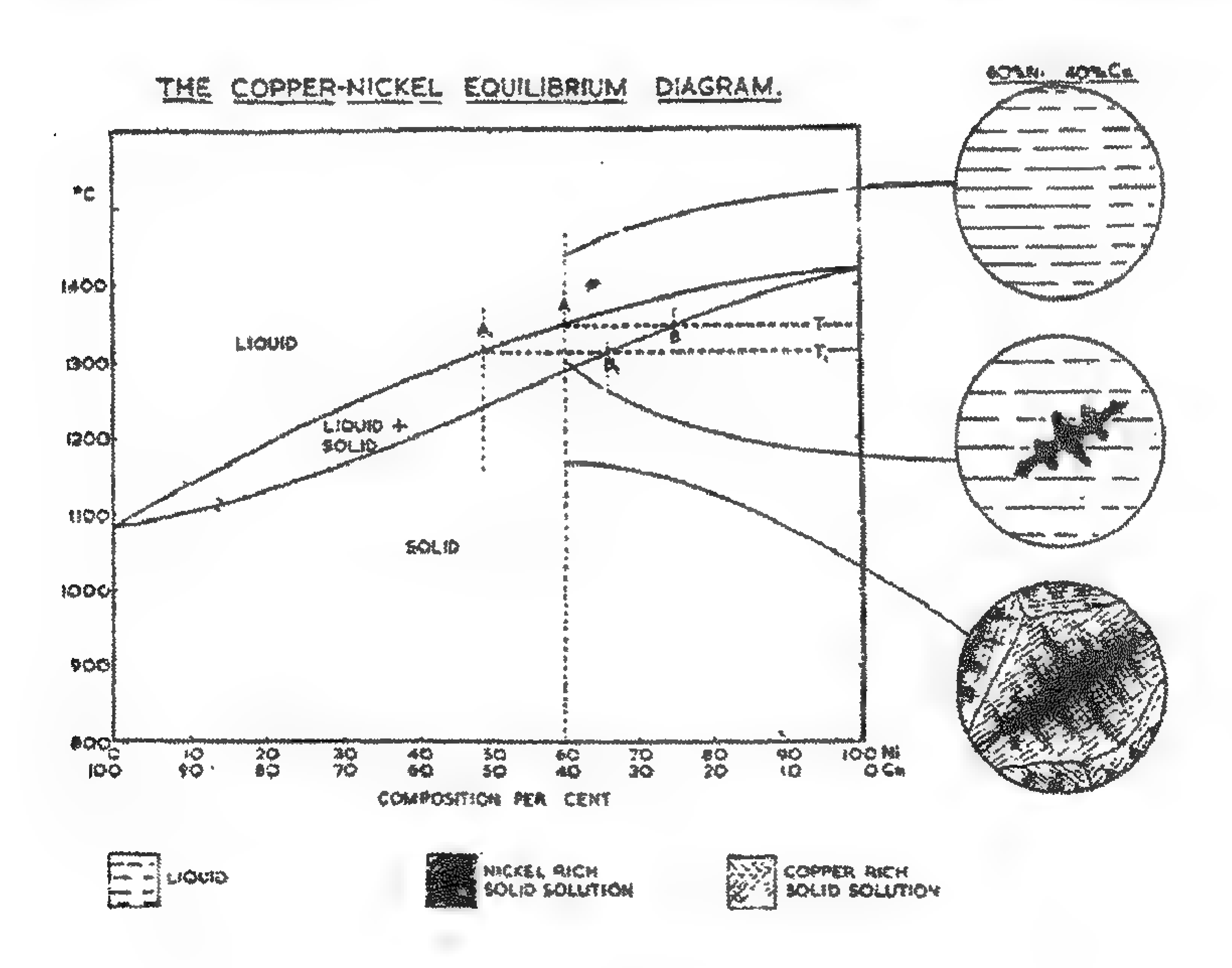
منحنيات التوازن الحراري لمعدنين قابلين للذوبان في بعضهما بأي نسب في الحالة السائلة ويظلان ذائبين في الحالة الصلبة:

هناك عدد كبير من ازدواج المعادن التي تحقق هذه الحالات وهي عادةً المعادن التي تكون محاليل صلبة بالإحلال من النوع غير المنتظم وذلك لأن ذرات المعدن الثاني تستطيع احتلال أماكن ذرات المعدن الأصلي بأي نسب، إضافة إلى ذلك فإن الذرات تكون عادة متقاربة الحجم في كل معدن من المعادن، كما أن المعادن ذاتها غالباً ما تكون ذات خواص طبيعية وكيميائية مشابهة لبعضهما، ومن أمثال تلك الحالة أنظمة سبائك الذهب مع الفضة والأنتيمون مع البزموث والنحاس مع النيكل حيث يكون كل اثنين من هذه المعادن سلسلة من المحاليل الصلبة وحيث أن سبائك النحاس والنيكل هي الوحيدة ضمن تلك المجموعات الثلاث المذكورة التي لها قيمة تجارية فإنه من الأفضل تناول هذا النظام، ويبين شكل 17- 3 منحنى التوازن الحراري بين النحاس والنيكل.

ونكرر أن هذا النظام من نوع منحنيات التوازن البسيطة وحيث أنه يشبه نظام الكادميوم والبزموث من ناحية أنه لا توجد تحولات في الحالة الصلبة فإن المنحنى يتكون من خطين فقط هما خط السيولة، وخط الصلابة، وفوق خط السيولة يتواجد محلول سائل متجانس لأي سبيكة في السلسلة بينما تحت خط الصلابة يكون لدينا محلول صلب واحد لأي سبيكة وعلى الرغم من أنه في حالة الصب (كما سنرى فيما بعد) فإن المحلول الصلب قد يختلف في التركيز نتيجة

لعملية الـ Coring وبين خطي السيولة والصلابة يتواجد كل من السائل والمحاليل الصلبة معاً.

لنتتبع تجمد سبيكة تركيبها A (شكل 17- 3) أي تحتوي على 60٪ نيكل و 40٪ نحاس، ونفترض أن التبريد يتم بسرعة كما هو الحال في الصناعة عند صب كتلة في القالب من الحديد الزهر، فعند درجة حرارة أعلى من T م° تكون السبيكة على هيئة محلول سائل متجانس ولكن بانخفاض درجة الحرارة أدنى من T تبدأ أنباتات من المحلول الصلب في الظهور، وهذه الانباتات بطبيعة الحال لا تكون بتركيب A ولكن بتركيب B الذي يمكن معرفته برسم خط درجة حرارة أدنى حيث يقطع الخط الرأسي المبين للتركيب خط السيولة إلى خط الصلابة وبذلك نجد أن الإنباتات التي تحتوي على 75٪ تقريباً من النيكل، وحيث أن السائل الأصلي كان يحتوي على 60٪ نيكل فقط فإن ذلك يترتب عليه انخفاض نسبة النيكل من السائل المتبقي، أي أن تركيبه يتحرك جهة اليسار أي إلى نقطة A_1 مثلاً.



الشكل 17- 3

منحنى التوازن الحراري للنحاس والنيكل

البنية المجهرية المبينة هي تحت ظروف غير متزنة من التجميد

وتستمر عملية التجمد بانخفاض درجة الحرارة من T_1 وخلال هذه الفترة تترسب طبقة من الصنف الصلب تركيبها B_1 وهي تحتوي عل نسبة من النيكل أقل من نسبته في البلورات الأصلية وباستمرار التجمد تتكون طبقات متتالية تحتوي على نسب أقل من النيكل وبالتالي نسب أكبر من النحاس حتى يستهلك السائل نهائياً، ومن ذلك يتضح أن المحلول الصلب يكون غير متجانس فيما تكون النسبة العامة فيه 60٪ نيكل، 40٪ نحاس فإنه ونتيجة لعملية الـ Coring فإن الهيكل المرن للبلورات يحتوي على 75٪ نيكل وأفرعه تحتوي على جوالي 50٪ نيكل.

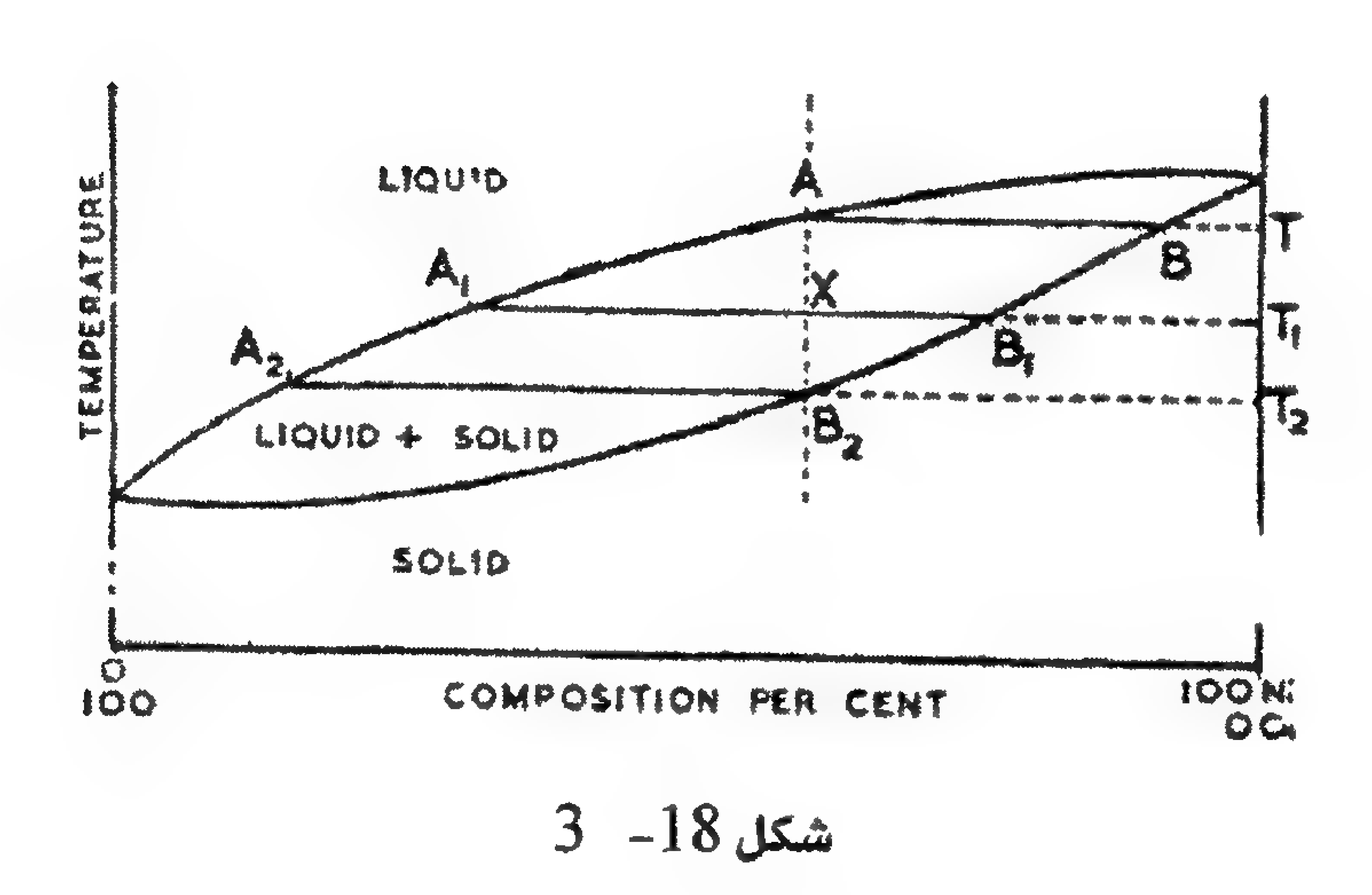
ويزداد تأثير الوضع بحدوث الانتشار الذي يتم في نفس الوقت مع عملية التبلور ونظراً لأن الطبقات المتتالية للسبيكة التي تترسب تكون أكثر اغتناءاً بالنيكل من السائل المتبقي فإن ذلك يؤدي إلى وجود تدرج في التركيز وهو ما يجعل ذرات النحاس تتحرك بالانتشار إلى جهة قلب الانباتات بينما تتحرك ذرات النيكل إلى جهة السائل الغني بالنحاس، ومن الحالة التي نتناولها الآن فإننا افترضنا بأن التبريد سريعاً جداً إلى الحد الذي كان الانتشار فيه قليلاً أو متوقفاً وأن البنية الداخلية تحت تلك الظروف لا تستطيع الوصول إلى حالة التوازن، ونظراً لأننا هنا نتناول حالات عدم التوازن فإن ما نستطيع أن نستخلص من منحنى التوازن هو قدر صغير فقط من المعلومات حيث يعتبر المنحنى في هذه الحالة دليلاً يشير إلى كيفية تكون البنية الداخلية، وإذا كان التبريد بطيئاً فإن الانتشار يحدث بطريقة ملحوظة مما يجعل عدم التجانس ضئيلاً ، كما أن التجمد عند درجة حرارة عالية بالدرجة الكافية يسمح أيضاً بحدوث الانتشار، مما ينتج عنه تكون حبيبات من محلول صلب تكاد أن تكون متجانسة.

والآن سوف يتم تتبع تبريد نفس السبيكة تحت ظروف بطيئة جداً بدرجة تضمن الوصول إلى حالة التوازن الكامل عند كل مرحلة من مراحل التجمد، في هذه الحالة نلاحظ أن السائل (ذو التركيب الممثل بنقطة A شكل 18- 3) سوف يبدأ التجمد عند درجة حرارة T بترسيب نواة للتركيب الممثل بنقطة B ويؤدي

ذلك على إنحراف تركيب السائل المتبقي جهة اليسار ولكن نظراً لبطء التبريد فإن الانتشار يمكن أن يصاحب عملية التجمد بحيث يسير التغير من التركيب الكيميائي للسائل تبعاً لخط السيولة من A إلى B_2 والتركيب الكيميائي للصلب تبعاً لخط الصلابة من B إلى B_2.

وعلى ذلك فإنه عند درجة حرارة ولتكن T_1 يكون التركيب الكيميائي للمحلول الصلب المتجانس ممثلاً بنقطة B_1 بينما يمثل التركيب الكيميائي للسائل المتجانس المتبقي في حالة توازن معه بنقطة A_1، وحيث أن التركيب للسبيكة عامة يمثل بنقطة × (A) فإن:

$$\frac{\text{وزن المحلول الصلب (التركيب } B_1)}{\text{وزن المحلول السائل المتبقي (التركيب } A1)} = \frac{XA_1}{XB_1}$$



شكل 18- 3

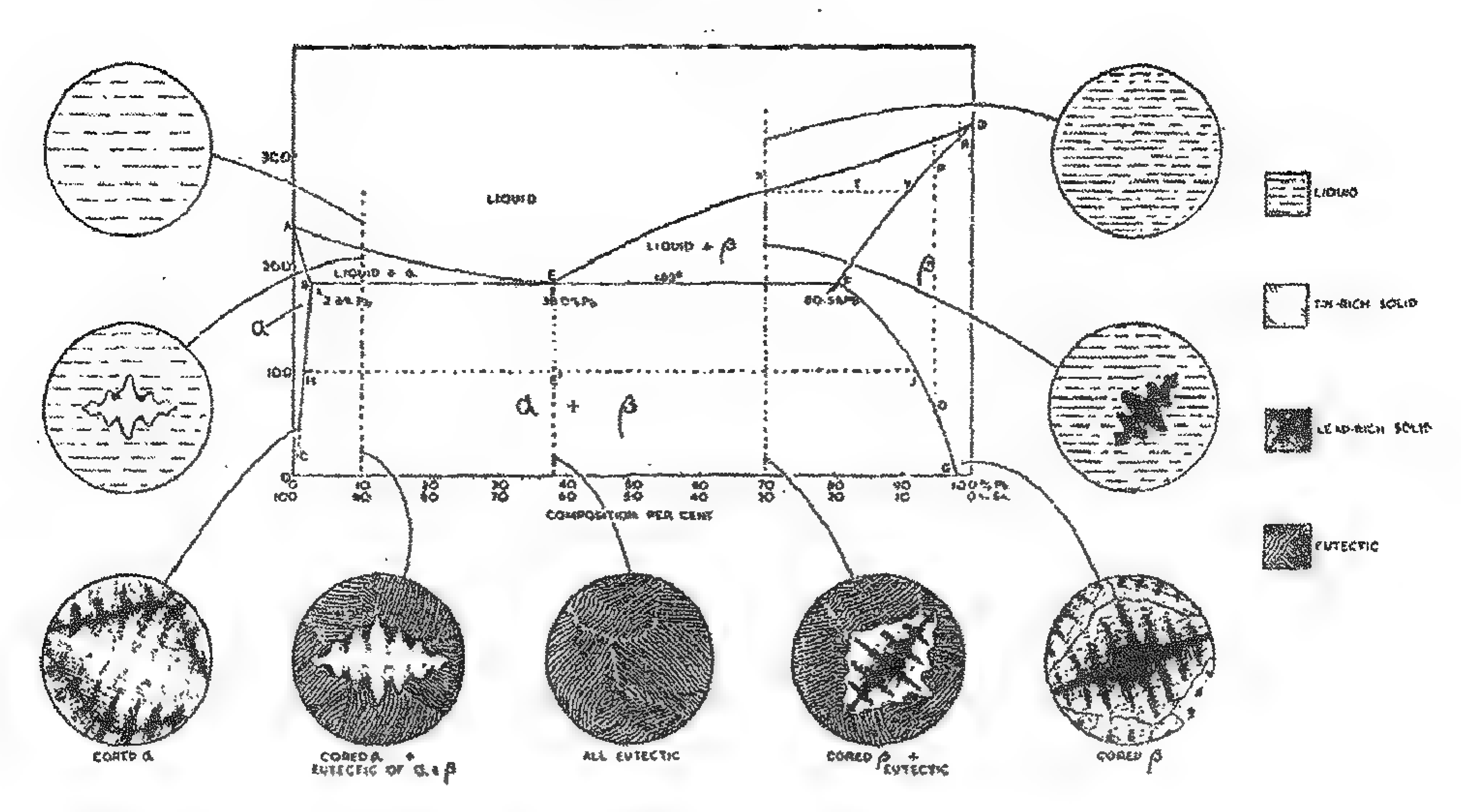
وتحت ظروف التوازن التام فإن منحنى التوازن الحراري يعطينا معلومات كاملة عن حالة النظام.

وعند درجة حرارة T_2 نجد أن آخر كمية من السائل بتركيب A_2 تختفي تماماً وبواسطة عملية الانتشار فإن تركيبه يمتص بواسطة الصلب الذي يكون ذو التركيب المتجانس بنقطة B_2 ويجب ملاحظة أن نقطتي B_2 , A تمثلان نفس

التركيب وهو ما يمكن ملاحظته بسهولة لأن السائل المتجانس قد استبدل بصلب متجانس.

منحنى التوازن الحراري لمعدنين تامي الذوبان في الحالة السائلة بأي نسب ومحدودة الذوبان في الحالة الصلبة:

هذه الحالة من حيث التأثير تعتبر حالة وسط بين الحالات سابقة الذكر، ومنحنى التوازن الحراري في هذه الحالة يعتبر تهجن hybrid بين النوعين السابقين، ففي حالة الكادميوم والبزموث كنا نحصل على يوتكتيك وفي هذه الحالة أيضاً على يوتكتيك ولكنه من محلولين صلبين بدلاً من معدنين نقيين (كما كان الحال في الحالة السابقة) والصفة الجديدة المميزة لهذا النظام بالمقارنة بالأنظمة السابقة هي أنه سيظهر لدينا صنف جديد عند حدود الحبيبات وذلك تحت خط الصلابة مما يدل على أن التغيرات في الصنف يمكن أن تحدث في الحالة الصلبة، ومن منحنى التوازن الحراري للقصدير والرصاص شكل 19- 3 الذي سوف نستخدمه كمثال لهذا النوع من الأنظمة نجد أن الصنف المكون لحدود الحبيبات يوضح بالخطوط BC ، FG ومن أمثلة هذه الخطوط أحياناً تسمى خط الإذابة (Solvus)، نظام القصدير – الرصاص كمقدمة لدراسة منحنيات التوازن الحراري.



شكل 19- 3

منحنى التوازن الحراري للقصدير والرصاص

البنية المجهرية المبينة هي تحت ظروف غير متزنة من التجميد

كما يتضح من المنحنى نجد أن هناك محلولين صلبين في النظام وذلك للأسباب التالية:

أ. يذيب القصدير نسبة من الرصاص بحد أقصى 2.6٪ عند درجة حرارة اليوتكنيك مكوناً محلول صلب الفا α.

ب. يذيب الرصاص نسبة من القصدير بحد أقصى 19.5٪ عند درجة حرارة اليوتيك مكوناً محلول صلب بيتا β.

(ويرمز عادة للأصناف المختلفة الموجودة في سلسلة السبيكة من اليسار إلى اليمين عبر المنحنى بأحرف أبجدية يونانية لسهولة الرجوع إليها)

ويبين ميل حدود الصنف BC، FG أن كلاً من ذوبانية الرصاص في القصدير (α) وذوبانية القصدير في الرصاص (β) تقل بانخفاض درجة الحرارة،

وهذه هي ظاهرة اعتيادية للمحاليل السائلة إضافة إلى المحاليل الصلبة وبالمثل فإن الشاي البارد يذيب نسبة من السكر أقل من الشاي الساخن على الرغم من أن كمية السكر التي نضيفها عادة تقل عن النسبة اللازمة لتكوين محلول مشبع أياً كانت درجة حرارة الشاي.

وفي حالة سبائك القصدير والرصاص فإن ميل حدود الصنف BC، FG تعني أن هناك تغيرات تحدث في الصلب، وهناك عدة بينات مجهرية مختلفة يمكن أن تتواجد وذلك تبعاً للتركيب الكيميائي للسبيكة، وعلى سبيل المثال نأخذ الأمثلة التالية:

أ. سبيكة تركيبها الكيميائي × (70٪ رصاص و 30٪ قصدير) تبدأ هذه السبيكة بالتجمد عندما تهبط درجة الحرارة إلى T حيث تترسب بنياتها بتركيب $\wp$ ، وتستمر السبيكة في التجمد على هيئة محلول صلب في درجة 138 °م حيث يكون تركيب آخر طبقة من الصلب ممثلاً بنقطة F (80.5٪ رصاص، 19.5٪ قصدير) ويكون تركيب السائل المتبقي ممثلاً بنقطة E (تركيب اليوتكتيك بنسبة 38٪ رصاص، 62٪ قصدير).

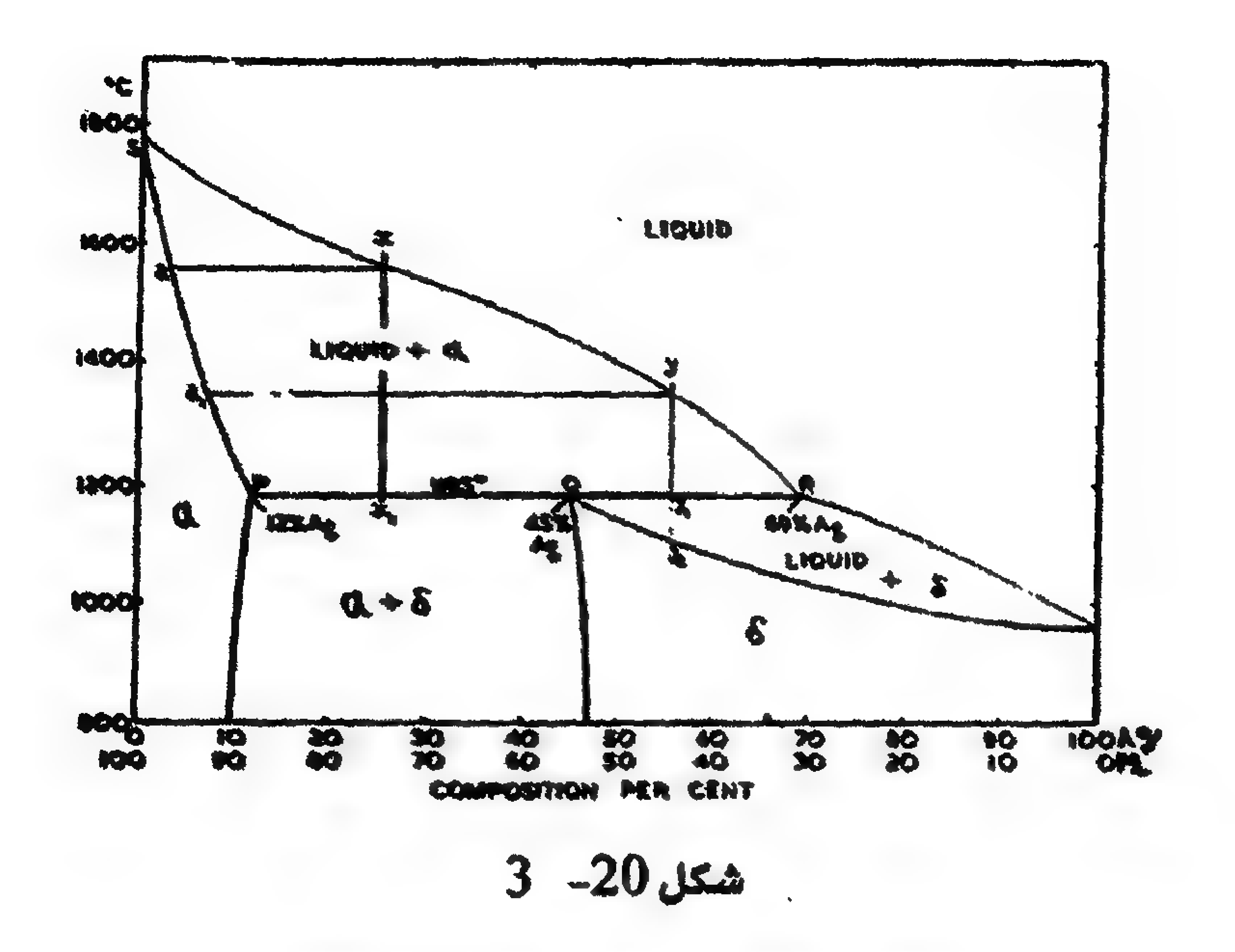
وعند ذلك يتجمد السائل المتبقي بترسيب طبقات متبادلة من المحاليل الصلبة $\propto$، β على هيئة يوتكتيك F,B على التوالي، فإن بردت تلك البنية عندئذ ببطء حتى درجة حرارة الغرفة فإن التركيب الكيميائي للمحاليل الصلبة $\propto$،β سوف يتبع الخطوط BC، FG أي أن المحلول الصلب $\propto$ سوف يصبح فقيراً من الرصاص ويصبح المحلول الصلب β فقيراً من القصدير حتى تصل درجة الحرارة إلى حوالي 100° م حيث يصبح $\propto$ محتوياً على أقل من 1٪ رصاص ويكون β محتوياً على أقل من 10٪ قصدير، كما أن نسبة $\propto$،β ستختلف أيضاً من $\frac{EF}{EB}$ عند 183° م إلى $\frac{E7}{FH}$ عند 100° م، وبنفس الطريقة يمكن افتراض أن البنية المجهرية قد بردت ببطء يكفي للسماح لإنباتات أولية من الصنف الصلب β للوصول إلى

التركيب المتجانس F فإن تلك الإنباتات ستتغير الآن في تركيبها الكيميائي إلى التركيب J عند 100° م وبذلك يرسب بعض ∝ بتركيب H وذلك لضبط تركيبها، وعند ذلك يترابط ∝ المترسب مع ذلك الموجود في اليوتكتيك.

ب. وإذا كانت السبيكة محتوية على 95٪ مثلاً من الرصاص ويردت ببطء يكفي لمنع التباعد في التركيب الكيميائي Coring فإن عملية التجميد تكتمل عند نقطة P وتكون النتيجة هي تكون محلول صلب متجانس B، وباستمرار التبريد البطيء تحدث تغيرات في الحالة الصلبة مبتدئة عند Q بترسيب كميات بسيطة من ∝ على حدود الصنف β بانخفاض درجة الحرارة وبذلك تقل نسبة القصدير في الصنف β، ونتيجة لذلك نجد أن البنية الداخلية النهائية تتكون من بلورات متجانسة من β تحتوي على حوالي 98٪ رصاص بنسب بسيطة من الصنف ∝ المترسب على حدود الحبيبات.

ج. وإذا كانت السبيكة الأصلية محتوية على نسبة من الرصاص أعلى من 98٪ وبردت ببطء فإن البنية الداخلية ستبقى محتوية على β كلية بعد تمام تجمدها عند نقطة R.

من الناحية العلمية نجد أنه من الصعب أن يكون التبريد بطيئاً بدرجة تكفي لمنع حدوث بعض التباعد في التركيب الكيميائي Coring، فنظراً لأن الإنباتات الأولية من β ستكون غنية نسبياً بالرصاص فإن ذلك يؤدي إلى تكون كميات بسيطة من ∝ على حدود حبيبات β من (جـ) وكمية أكبر من المتوقع من ∝ في (ب)، وفي الحالة (جـ) نجد ان الـ ∝ سيذوب عند التخمير، وعملية تخمير المحلول (Solution annealing) هي عملية هامة تستخدم في معالجة عديد من السبائك بهدف إذابة مكون من المكونات التي تترسب نتيجة لعملية التباين في التركيب الكيميائي Coring، وبعد المعالجة تصبح السبيكة لينة ومطيلية ductile بحيث تتقبل عمليات التشكيل على البارد ويعتبر التخمير المحلولي (Solution annealing) أيضاً جزء مكمل لأغلب عمليات التقوية المبنية على أساس التصلد بالترسيب (Precipitation hardening).



شكل 20- 3

منحنى لبتوازن الحراري للبلاتين والفضة

وعند 1185° م وهي درجة حرارة اليوتكتيك نجد أن إنباتات ∝ تبدا في التفاعل مع السائل المتبقي وتكون محلول صلب d الذي يحتوي على 45٪ فضة (شكل 20- 3) بتركيب Q وحيث × تقع بين P، Q فإن ذلك يعني أن هناك زيادة في المحلول الصلب ∝ أدت إلى استهلاك السائل أولاً وبنتيجة لذلك نجد أن البنية الداخلية النهائية تحتوي على الصنف ∝ المحتوي على 12٪ فضة بتركيب (بتركيبP)، وهي المحتوي على 45٪ فضة (بتركيب Q)، وتتواجد تلك الأصناف بالنسبة التالية:

$$\frac{\text{وزن الصنف} \propto \text{(بتركيب P)}}{\text{وزن الصنف } \delta \text{ (بتركيب Q)}} = \frac{X_1Q}{X_1P}$$

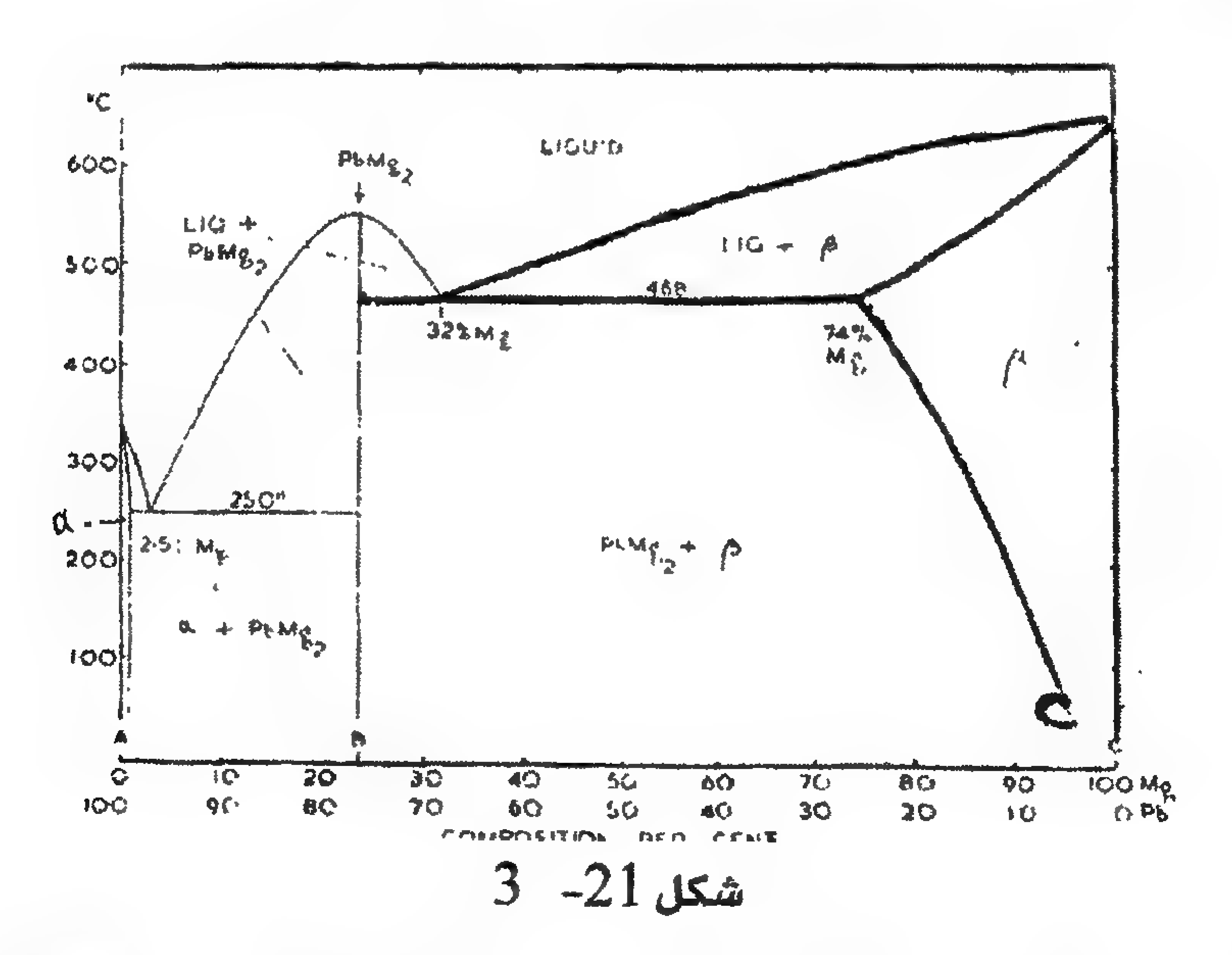
ونلاحظ الآن سبيكة سائلة تركيبها الأولي Y، تلك السبيكة تبدا في التجمد بترسيب بللورات من ∝ بتركيب Q وإذا تجاهلنا وجود تباين في التركيب الكيميائي فإن البللورات تتغير تدريجياً في التركيب حتى P عندما تكون درجة الحرارة قد اخفضت إلى 1195° م يكون التركيب الكيميائي للسائل المتبقي أيضاً R، وعند هذه المرحلة تكون الأصناف بالنسبة التالية:

$$\frac{\text{وزن الصنف } \propto \text{ (بتركيب } P)}{\text{وزن السائل المتبقي (بتركيب } R)} = \frac{Y_1R}{Y_1P}$$

وعندما يحدث التفاعل البرتيكتيكي نجد أن هناك زيادة في السائل لأن Y_1 تقع بين Q،R، لذلك يستهلك الصنف $\propto$ تماماً ويكون تحت 1185°م مباشرة يتكون محلول صلب جديد δ وبعض السائل المتبقي بالنسبة التالية:

$$\frac{\text{وزن الصنف (بتركيب)}}{\text{وزن السائل المتبقي (بتركيب } R)} = \frac{Y_1R}{Y_1Q}$$

وباستمرار انخفاض درجة الحرارة ببطء نجد أن السائل المتبقي يتجمد على هيئة δ الذي يتغير تركيبه تبعاً للخط QY_2 وعند Y_2 تنتهي عملية التجمد تماماً وتصبح البنية الداخلية مكونة من بللورات من δ المتجانس بنفس تركيب السائل الأصلي، وفي الحياة العملية قد نجد بعضاً من $\propto$ المتبقي في البنية النهائية وذلك لأنه قد أصبح محاطاً بطبقة واقية δ عندما بدأ التفاعل.



شكل 21- 3

منحنى التوازن الحراري للرصاص والمغنيسيوم والذي يبين تكوين مركبات معدنية

منحنى التوازن الحراري لمعدنين يكونان معاً صنفاً أو أكثر من الأصناف الوسيطة (مركبات معدنية) intermetallic compounds

غالباً ما يحدث أن نجد أن معدنين لا يكونان معاً فقط محاليل صلبة محدودة بل يتحدان أيضاً معاً وبنسب أخرى مناسبة لتكوين مركبات معدنية.

وهنا يلاحظ أن تكوين مركب معدني يزيد من تعقيد منحنى التوازن الحراري وذلك بإدخال صنف آخر منه نظراً لأن بعض أنظمة السبائك تحتوي على عدد من المركبات المعدنية المتكونة عند تركيبات مختلفة داخل النظام فإن المنحنى الناتج يصبح معقداً، ولنبدأ بفحص منحني الرصاص والمغنيسيوم شكل (21- 3) كمثال بسيط لمثل هذا النظام المركب.

ويحتوي هذا النظام على مركب معدني واحد $Pb\ Mg_2$ (يحتوي على 23.4٪ مغنيسيوم) ويبدو هنا وكأن لدينا منحنى توازن بسيطين مستقلين متصلين معاً عند B ويمثل الجزء AB من المنحنى سلسلة السبائك البوتكتيكية (من نوع سبائك القصدير والرصاص) وتحتوي على α والمركب المعدني $Pb\ Mg_2$، بينما نجد أن الجزء BC يمثل أيضاً سلسلة من السبائك اليوتيكتيكية المحتوي على $Pb\ Mg_2$ والمحلول الصلب β، وإذا أردنا اعتبار النظام بالكامل بين الرصاص النقي والمغنيسيوم النقي فإنه سيكون من الواضح أن الجزئين يصبحان متصلين كما يبين شكل(21- 3) مكوننين منحنى كامل.

الوحدة الرابعة

الفولاذ (الصلب) الكربوني وحديد الزهر وسبائكهما

الصلب (الفولاذ) وانواعه

يمكن تقسيم الصلب بأنواعه إلى قسمين رئيسين:

الصلب الكربوني والصلب السبائكي Carbon Steel and Alloy steel

أولاً: الصلب الكربوني:

وهو عبارة عن سبيكة بين الحديد والكربون (كربيد الحديد) ويسمح بوجود عناصر أخرى مصاحبة ما دامت نسب وجودها لا تتجاوز حدوداً ضيقة.

وينقسم الصلب الكربوني إلى قسمين حسب نسبة الكربون:

أ. صلب منشآ إلى 0.6٪ كربون.
ب. صلب العدة من 0.6٪ إلى 1.2٪ كربون.

ثانياً: الصلب السبائكي Alloy steels:

ويشمل على عناصر مختلفة لتكوين سبائك بينها وبين الحديد وذلك بجانب الكربون وبعض الشوائب مثل الفسفور والأوكسيجين التي تنتج في أثناء عمليات إنتاج الصلب وهو شوائب غير مرغوب فيها لأنها تغير خواص الصلب ولذلك يجب الحد من وجودها إلى أضيق الحدود.

وأما المنجنيز والسيليكون والتي تؤثر تأثيراً معيناً في خواص الصلب فقد يحتفظ بها بنسب أكبر وفي هذه الحالة لا تعتبر هذه شوائب بل عناصر داخلة في السبيكة.

وأما العناصر الغالب إدخالها في الصلب لتكوين سبائك معه فهي النيكل، الموليبدينم، الكروم، التنجستن، الكوبلت، والتيتانيوم وغيرها.

وتسمى سبائك الصلب باسم العناصر أو العنصر الفعال في إحداث التغيير الجوهري في خواص الصلب فمثلاً الصلب المركز من:

- كربون 0.1٪ - 0.2٪
- منجنيز 0.3٪ - 0.6٪.
- نيكل 0.4٪ - 0.6٪.

يسمى الصلب النيكلي.

الغرض من عمل سبائك الصلب:

الغرض من إضافة العناصر المذكورة هو تغيير خواص معينة أو حتى إكساب الصلب خواص جديدة، أو تغيير مركب الصلب الذي يمكن الحصول عليه في درجة الجو أو تغيير صورة التحول Transformation فمثلاً نحصل على:

أ. تحسين الخواص الميكانيكية مثل تغيير حد المرونة أو مدى اللدونة.

ب. تحسين خواص مقاومة التأكسد والصدأ ومقاومة فعل الحرارة.

ج. تحسين خواص القطع على آلات التشغيل (مثل صلب التشغيل الأتوماتي الذي يحتوي على نسبة عالية من الفسفور والكبريت).

د. تحسين الخواص الطبيعية مثل المغناطيسية والتمدد الحراري.

ه. تغيير مركب الصلب ونهج معاملاته الحرارية لملائمة ظروف خاصة.

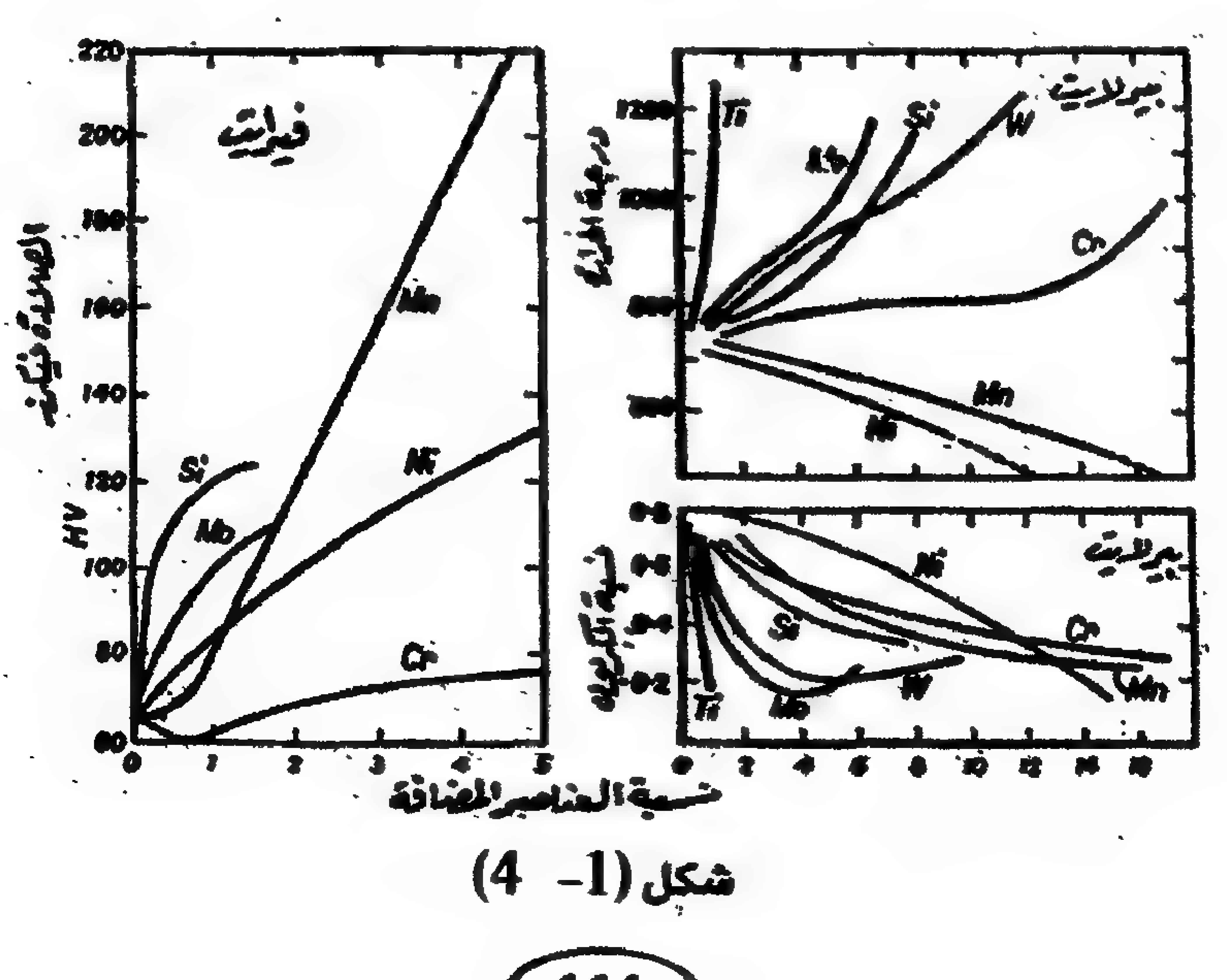
أثر العناصر المضافة إلى الصلب:

ويمكن إيجازها فيما يلي:

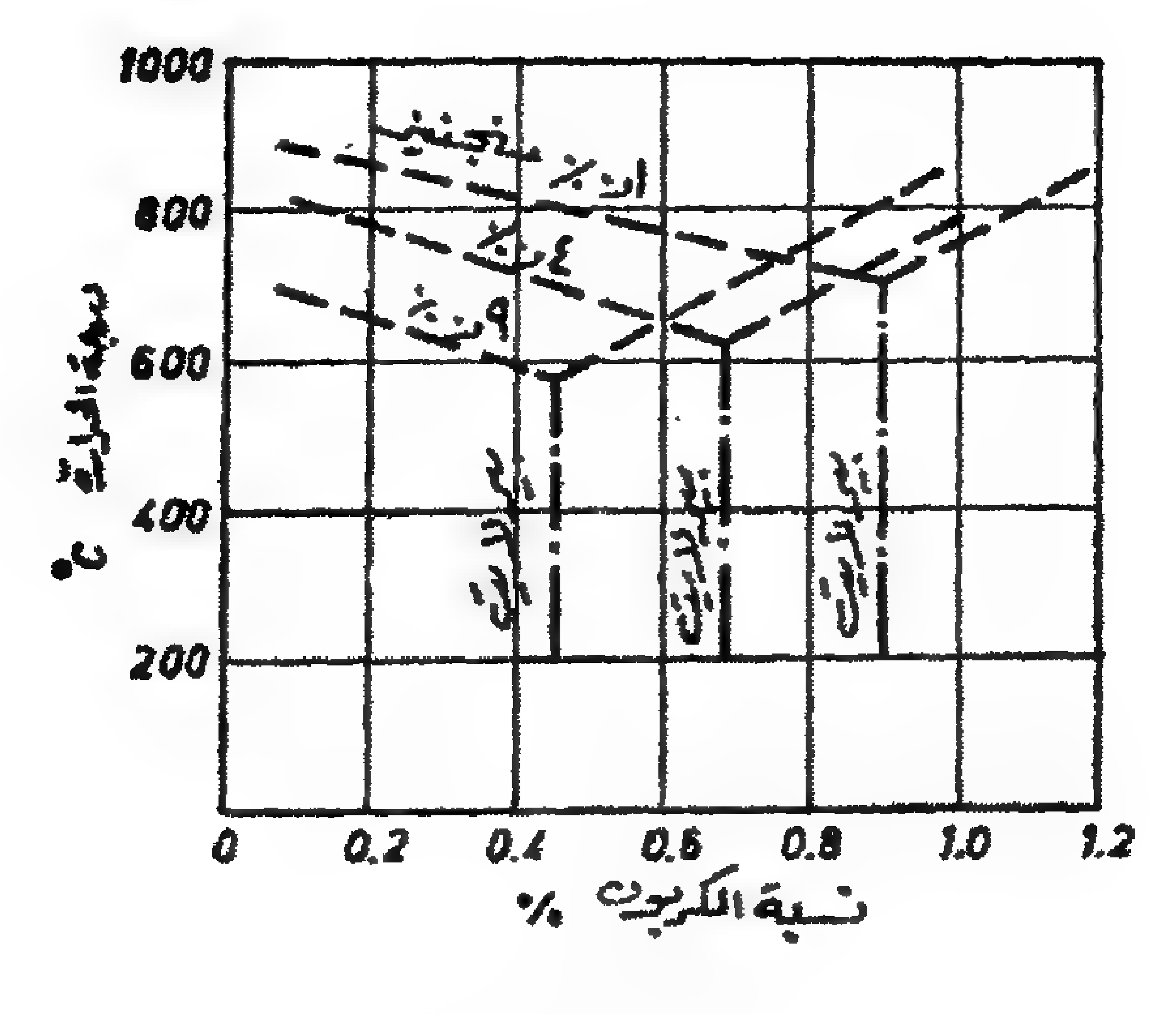
1. أن تذوب في الحديد في الحالة المتجمدة ويتبع ذلك في المعتاد تحسن في الخواص.
2. تكوين كربيدات بجانب السمنتايت Fe3C مثل Cr C.
3. تكوين مركبات معدنية مثل صنف سيجما σ (Fe Cr) أو Fe3 W2
4. التأثير على المعدلات الحرجة مثل:

أ. تغيير نقط Ac شكل (1- 4) و (2- 4).
ب. تغيير تركيز البيرلايت شكل (1- 4) و (2- 4).
ج. تغيير معدل التبريد الحرج اللازم لتكوين الباينايت أو المارتنسايت من الأوستنايت جدول (1- 4).

وفي هذه الحالة نلاحظ انخفاض معدل التبريد الحرج اللازم للتحول المارتنسيتي بإضافة الكروم أو المنجنيز الأمر الذي يساعد على استخدام معدلات تبريد هادئة بطيئة في عمليات التقسية للقطع السميكة دون أن تتعرض للتشويه أو التشرخ نتيجة لمعدلات التبريد السريعة.



شكل (1- 4)



شكل (2- 4)

جدول (1- 4)

النسبة المئوية		معدل التبريد اللازم للتحول المارتنسيتي C/S° عند $650^{\circ}C$
الكربون	العنصر المضاف	
0.42	55٪ منجنيز	550
0.40	1.6٪ منجنيز	50
0.42	1.12٪ نيكل	450
0.40	4.8٪ نيكل	85
0.38	2.64٪ كروم	10

اكتساب بعض صفات خاصة للعناصر المضافة مثل:

أ. الإقلال من حساسية الصلب للتغيرات الحرارية مثل جعل معاملاته الحرارية مستقرة (لا تتأثر القساوة مثلاً بارتفاع درجة حرارة التشغيل كالحال في صلب العدة الأمر الذي يمكن استخدامه في دراجات حرارة مرتفعة قد تصل إلى نحو 550° C دون أن تقل الصلادة بل قد تزداد في بعض الأحوال.

ب. تنظيف الصلب كيميائياً من الشوائب (مثل إضافة الفناديوم بنسب ضئيلة الذي ينظف الصلب من الشوائب ومثل إضافة المنجنيز والزركون التي تتحد مع الكبريت مكونة سلفيدات).

ج. تكوين أكاسيد العناصر المضافة وتركيزها على السطح فتقي الصلب من الصدأ والتآكل بفعل عوامل التعرية حتى درجات الحرارة المرتفعة (مثل عناصر الكروم والألمنيوم والسيليكون والنحاس).

د. ازدياد مقاومة الزحف Creep Strength بتواجد كربيدات دقيقة مثل الموليبديوم.

ويمكن بصفة عامة تقسيم الصلب السبائكي إلى الأقسام الآتية حسب مجال استخداماتها:

1. صلب المنشآت.
2. مواد أدوات القطع.
3. صلب مغناطيسي.
4. صلب لا يصدأ وصلب يقاوم فعل درجات الحرارة المرتفعة.

أولاً: صلب المنشآت وأجزاء الآلات Structural steels:

وينقسم في الحقيقة إلى أنواع عديدة حسب مجال الاستخدام باعتبار احتمال الاجتهادات المختلفة ونوعها ولو أنه لا يمكن وضع حد فاصل بين كل نوع والآخر فخواص كل نوع يمكن تغييرها بالمعاملات الحرارية بحيث توافق نوعاً آخر يختلف عنه في العناصر المكونة أو نسبها، ويمكن الرجوع إلى المواصفات البريطانية والألمانيةأو الأمريكية وغيرها لمعرفة تفاصيل تقسيم هذه الأنواع.

ويمكن إيجاز تقسيم صلب المنشآت فيما يلي:

1. صلب المنشآت الخفيفة (أو المجهدة بالإجهادات البسيطة) وعادة يغطي احتياجاتها للصلب الكربوني في الحالة المخمرة أو في بعض الأحوال المقساة والمراجعة أو المدلفنة على البارد قليلاً ويقصد بالمنشآت الجمالونات والجسور وبأجزاء الآلات المحاور والأعمدة والمسامير والتروس، وهذه قد قد يدخل في تركيبها أو قد لا يدخل في تركيبها عناصر أخرى كالمنجنيز والكروم والنيكل والموليبدينم بنسب ضئيلة أو كبيرة تتدرج في وجودها حسب الخواص المطلوبة.
2. صلب النوابض Spring steel ويحتوي في المعتاد على نحو (كروم + 0.2٪ فاناديوم) أو (2٪ سيليكون + 1٪ منجنيز) ويقسى بالتسقية في الزيت عند درجة $860^{\circ}C$ ويراجع عند $480^{\circ}C$ وهناك أنواع أخرى من صلب النوابض (صلب كربوني 0.6 إلى 1.2 كربون) تقسي بالتسقية وتطبع عند درجات حرارة منخفضة ($170^{\circ}C$ إلى $300^{\circ}C$ بعد تشكيلها).
3. صلب بمعامل تمدد حراري مرتفع أو منخفض: تحتاج بعض أجزاء المنشآت إلى أنواع من الصلب تتميز بارتفاع معامل تمددها الحراري لتوافق أجزاء أخرى مرتبطة بها لها من سبائك أخرى كالألمنيوم لها معامل تمدد حراري مرتفع (كمسامير ربط رؤوس الاسطوانات).
4. صلب كرات كراسي المحاور (المدحرجات) الأسطوانية والكرات:

ويحتوي في المعتاد على:

- كربون 1.0
- منجنيز 0.5
- كروم 1.36

ويقسى بالتسقية في الزيت من درجة حرارة $810^{\circ}C$ ثم يطبع عند درجة حرارة 100 إلى $200^{\circ}C$

5. صلب مواسير نقل البخار (تقاوم الزحف): يقاوم هذا الصلب الزحف عند درجات حرارة حتى $550^{\circ}C$ ويحتوي في المعتاد على 0.15٪ إلى 0.2٪ كربون بجانب 0.5٪ موليبيديوم + 0.25٪ فاناديوم.

ثانياً: مواد أدوات القطع:

يجب أن تتوافر في المواد أو في الأدوات القاطعة عدة شروط أهمها:

أ. أن تكون أصلد من المادة المطلوب قطعها (الشغلة).

ب. أن تحافظ على صلادتها وحدة حدها القاطع في ظروف التشغيل (قوى القطع – درجة الحرارة – البرى) أي أن يكون عمرها طويلاً.

ج. أن تكون اقتصادية.

وأهم مواد العدد القاطعة هي:

1. الصلب الكربوني المعروف باسم صلب العدة، ويعتبر أشهرها واكثر مواد القطع شيوعاً في الاستخدام العملي نظراً لسهولة إنتاجه ورخص تكاليفه وهو في تركيبه لا يخرج عن الحدود التالية:

كربون ٪	سيليكون ٪ حد أقصى	منجنيز ٪ حد أقصى	فسفور ٪ حد أقصى	كبريت ٪ حد أقصى	حديد٪
1.20 -0.70	0.3	0.3	0.03	0.03	الباقي

ويقسى هذا الصلب بالتسخين إلى دجة حرارة التحول الأوتستنيتي $780^{\circ}C$ إلى $820^{\circ}C$ والتسقية في الزيت ثم التطبيع في درجات حرارة تتراوح بين $200^{\circ}C$ إلى $320^{\circ}C$ حسب ظروف التشغيل ويصنع من هذا الصلب كل أنواع العدد القاطعة اليدوية التي لا تتطلب سرعات قطع عالية بالمناشير والأجنات والمبارد وأقلام القطع بالمخارط والمقاشط في السرعات المنخفضة التي لا تراقب عليها ارتفاع في درجة الحرارة إلا في حدود $300^{\circ}C$ كحد أقصى إذ أن الصلب يفقد صلادته التي اكتسبها بالمعاملة الحرارية والتطبيع إذا ارتفعت درجة حرارته فوق $300^{\circ}C$.

2. الصلب سريع القطع (السرعات العالية) High speed steel (HSS)

يستخدم هذا الصلب عند القطع بسرعات مرتفعة ترتفع معها درجات الحرارة حتى 600° C وهو صلب سبائكي يحتوي في أهم أنواعه على ما يلي:

كربون %	تنجستن%	كروم %	فاناديوم%	كوبلت%	حديد%
0.65- 0.85	14- 12	4	1- 3.25	3- 9	الباقي

ويعالج هذا الصلب بالتسختين ببطء حتى درجة 750 ° C (لتجنب التشرخ) ثم يزاد معدل التسخين في غرفة تسخين ذات كفاءة عالية حتى 1350°C (لتجنب الأكسدة وتغلظ الحبيبات في هذا النطاق) ثم التبريد في هواء راكد وتجري عملية التطبيع بعد ذلك بإعادة التسخين حتى درجة 600°C، ويصنع من هذا الصلب معظم العدد القاطعة في ماكينات التشغيل سريعة القطع مثل أقلام المخارط والمقاشط والمثاقيب ومقاطع التفريز.

3. الصلب السبائكي: Cast Alloy Steel

ويعرف منه أنواعاً عديدة أهمها كروبالت Crobalt والاستليت Stellite وهي عبارة عن صلب كربوني يحتوي على كوبلت وكرون Deloro و ديلورو وتنجستن في الحدود التالية:

كربون %	تنجستن	كروم	كوبلت	موليبيديوم+ حديد+ فاناديوم+ نيكل
1.8إلى2.15	19 إلى 17	30- 35	43- 48	(كميات ضئيلة تمثل الباقي)

4. الكربيدات الملبدة، اللقم الخزفية، الماس:

وهي مواد بالغة الصلادة لا يدخل في تركيبها الحديد إطلاقاً، وتستخدم في القطع بسرعات بالغة الارتفاع وحتى درجات حرارة تصل إلى نحو $1000^{\circ}C$ فالكربيدات تصنع من مساحيق كربيد التنجستن أو كربيد التنتاليوم أو كربيد التيتانيوم ويضاف إلى المسحوق كوبلت كمادة رابطة ثم تكبس على البارد في قوالب بشكل لقم (أطراف القطع المطلوبة) ثم تلبد بالتسخين في أفران خاصة ذات جو خاص مختصل للأكاسيد (كالنشادر المتحلل) حتى درجة حرارة بلغ نحو $1400^{\circ}C$

ومن ناحية أخرى تصنع اللقم الخزفية بذات الأسلوب (التلبيد باستخدام 95٪ مسحوق أكسيد الألومنيوم+ 5٪ سليكا).

وتستخدم الأطراف الماسية في عمليات القطع الدقيقة (التشطيبة) للحصول على أسطح ناعمة بالغة الدقة عند القطع بسرعات عالية.

ثالثاً: صلب المغناطيس:

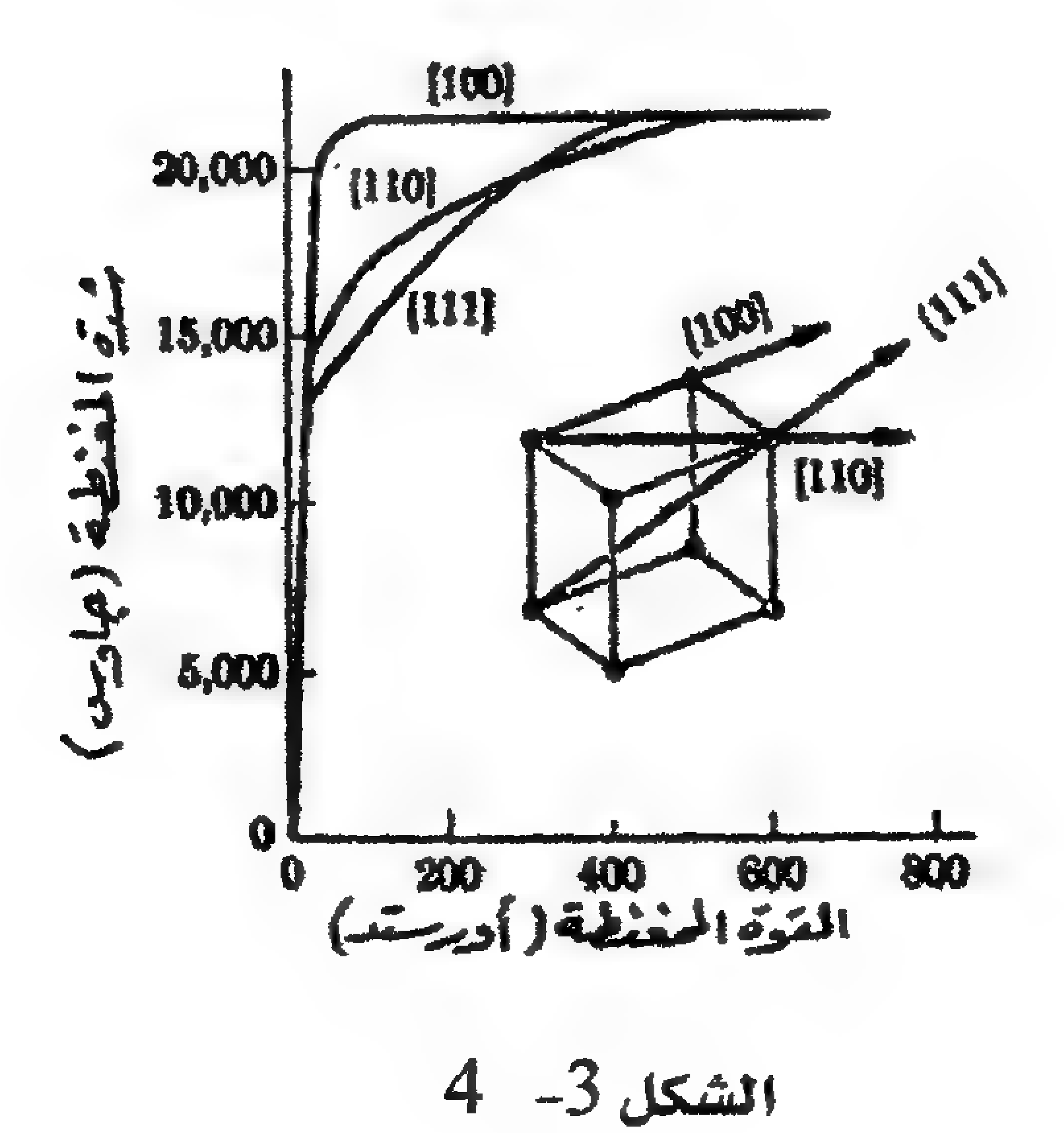
وينقسم إلى نوعين رئيسين:

أ. صلب مغناطيسي مؤقت: Soft magnets
ب. صلب مغناطيسي دائم: Hard or permanent magnets

وهناك علاقة ثابتة بين الصلادة الميكانيكية في الفلزات ودرجة صعوبة المغنطة أو فقدها Magnetic Hardness فالفلزات النقية المخمرة تكون ذات صلادة ميكانيكية منخفضة (أي لدنة) وتكون طرية في خواصها المغناطيسية، وبينما ترتفع الصلادة بارتفاع الإجهادات الداخلية (بالتشكيل على البارد) أو بإضافة عناصر أخرى أو بالتسقية أو بالتسريب وكذلك ترتفع صعوبة المغنطة وصعوبة فقدها.

1. المغناطيس الطري: Soft Magnets

وهي المستخدمة في المولدات والمحركات الكهربية (صناعة الأقطاب المغناطيسية) وقلب Core المحولات الكهربية، والمواد المستخدمة في هذه الأنواع تتميز بقلة التعويق (والمفاقيد المغناطيسية) بجانب ارتفاع مقاومتها الكهربية لتقليل مفاقيد التيارات الدوامية ويستخدم في هذا المضمار الحديد النقي المضاف إليه 4٪ - 5٪ سيليكون وذلك في شكل رقائق أو مسحوق ملبد (مخبوز) في حالات استخدام الترددات المرتفعة، وهناك سبائك خاصة ذات معاملات نفاذة مرتفعة والتي تسمى Permalloy والتي تحتوي على 78.5٪ نيكل + 21.5٪ حديد ومن ناحية أخرى فمن المعروف أن الخواص الطبيعية للفلزات ومنها الخواص المغناطيسية تتوقف على اتجاه قياسها في بلورات الفلزات، فالأنفاذية المغناطيسية Permeability تبلغ اقصاها في اتجاه حواف الخلية المكعبة (100) شكل (3- 4) ولذلك يمكن استغلال ذلك بتوجيه البلورات (بالدلفنة العنيفة والتخمير)، أو التبريد من المنصهر في مجال مغناطيسي للتحكم في اتجاه البلورات وهناك على هذا الأساس السبائك الأخرى المسماة Crystalloy ببلورات موجهة من سبائك السيليكون والحديد وكذلك سبائك النيكل والحديد 50٪، 50٪ والتي تتصف بمنحنى تخلف شكله مستطيل شكل (3- 4).



الشكل 3- 4

2. المغناطيس الدائم Permanent or Herd Magnets

أول أنواعها الصلب المرتفع في نسبة الكربون المقسى وقد أمكن إضافة الكروم والتنجستن والكوبلت للحصول على مغناطيس أقوى وأخيراً خرجت إلى الوجود سبائك المغناطيس الدائم وتحتوي على الألمنيوم والنيكل كالتالي:

- كربون 0.6
- ألمنيوم 13
- نيكل 25

وقد يضاف إليها نحو 25٪ كوبلت، وهذه السبائك من أشهر الأنواع المعروفة في المغناطيس الدائم ويطلق عليها سبائك Alnico نسبة إلى مكوناتها.

رابعاً: الصلب المقاوم للصدأ والصلب الذي يقاوم فعل درجات الحرارة المرتفعة: Stainless Steels & High temperature Alloys

يدين الصلب في مقاومته للصدأ لوجود الكروم به في المقام الأول ويمكن تقسيم الصلب المقاوم للصدأ إلى الأنواع الآتية:

أ. صلب مقاوم للصدأ يمكن معالجته حرارياً.

ويحتوي على نسب تتراوح بين 12٪، 14٪ كروم مع نسب ضئيلة من الكربون تتراوح بين 0.1٪ - 0.4٪ ونسبة الكروم الموجودة في هذه الحالة لا تكفي للتحول الفريق الكامل لذلك يمكن معالجتها حرارياً.

وتتوقف الخواص الميكانيكية على نسبة الكربون في المقام الأول بينما تزداد مقاومة الصدأ ومقاومة فعل ارتفاع درجة الحرارة بارتفاع نسبة الكروم، وعلى النقيض من ذلك تزداد صعوبة اللحام لهذه الأنواع من الصلب بارتفاع نسبة الكروم.

وعند ارتفاع نسبة الكروم إلى نحو 18٪ فإن المقاومة للصدأ وفعل درجة الحرارة تزداد وتستخدم هذه الأنواع في أعمدة المضخات المعرضة للصدأ الكيميائي Chemical corrosion أو الأجزاء المعرضة لدرجة حرارة متوسطة بجانب الاجهادات العالمية.

السبائك المقاومة لفعل درجات الحرارة العالية: High Temperature Alloys

يتطور صناعة الطيران وخاصة الطائرات السريعة باستخدام المحركات النفاثة للطيران بسرعات تفوق سرعة الصوت عدة مرات تطلب الأمر استخدام أنواع من الصلب تتحمل الجهود العالية في درجات الحرارة المرتفعة (إلى 950 أو أعلى) وتقاوم الزحف Creep والاهتزازات والصدأ والتآكل والاحتراق عند هذه الدرجات بجانب تحمل الصدمات الحرارية ولكون الصلب الأوستنيتي والفريتي والقابل للمعاملات الحرارية لا ترقى خواصها لتحمل هذه الدرجات علاوة على مقاومتها للتشكيل على البارد فقد أمكن ابتكار أنواع أخرى من الصلب أو السبائك التي لا تحتوي على الحديد على الإطلاق سيأتي الإشارة إلى أهمها، وبجانب هذه المجالات هناك مجالات أخرى تحتم استخدام سبائك تتحمل درجات الحرارة العالية مثل صمامات العادم في آلات الاحتراق الداخلي، والنقالات في أفران المعاملات الحرارية – والمعوجات الحرارية – ومعامل تكرير زيوت البترول Oil Cracking.

ويمكن إيجاز مزايا هذه الأنواع في الخواص التالية:

1. مقاومة الصدأ والتقشير Scaling.
2. الاحتفاظ بمقاومة الاجهادات (بأنواعها المختلفة مثل الزحف، الاهتزازات) عند درجات الحرارة العالية.
3. استقرار المركبات المكونة لبنية السبيكة أو الصلب دون تحللها أو ترسيبها أو تكوين صنف Sigma σ في الصلب المحتوى على نسبة عالية من الكروم (صنف σ عبارة عن Cr و Fr وهو صنف صلد جداً وقصفي وليست له خواص

مغناطيسية ويتكون من أصل الفيرايت ويصحب تكوينه تقلص في الأبعاد مما يسبب شروخاً رقيقة عند أماكن تكوينه وهو يتبلور في صورة مركبة بطراز B.C.C يمكنها إذابة عناصر أخرى مثل النيكل أو السيليكون)، ويزداد احتمال هذا الصنف في السبائك المحتوية على الكروم والحديد عند تسخينها بين 500 – 1000° C ويشجع هذا التكوين أيضاً على وجود عناصر السيليكون والنوبيوم والموليبدينم والتنجستن أما النيكل فهو عنصر يساعد على عدم تكون هذا الصنف أي يجعل سبائك الصلب الكرومي مستقرة Stabilised.

4. الاحتفاظ ببعض الخواص الأخرى مثل المقاومة الكهربائية عند درجات الحرارة المرتفعة أو معامل التمدد الحراري أو مقاومة فعل غازات الاحتراق (كالأفران أو التربينات الغازية)، أو مقاومة الارتفاع أو الانخفاض المفاجئ في درجات الحرارة (الصدمات الحرارية) أو اكتساب الصلب أو السبيكة خواص تشغيل أو لحام ليمكن تشكيلها.

ويمكن إكساب الصلب الكربوني كثيراً من هذه الخواص بتكوين سبائك على السطح فقط بين الحديد والألمنيوم وذلك بالتسخين عند درجة حرارة 1000°C بعد غمس الشغلة في مسحوق الألمنيوم بالطريقة المعروفة بالكلورة (Calorising) أو برش الصلب بطبقة من الألمنيوم المنصهر ؟؟؟؟ ثم الدهان بدهان بتيوميني Ibitumastic paninto لمنع الأكسدة ثم التسخين إلى درجة حرارة C ° 780 وتسمى هذه العملية (Alumising) أي التغطية بالألمنيوم.

صلب ريش التربينات الغازية: وفيها يهتم بمقاومة الزحف Creep بجانب الصدأ والصدمات الحرارية الخ.

وأهمها ما يأتي:

أ. **سبائك أساسها الحديد:** وتحتوي على الكروم والنيكل والكوبلت والموليبدينم والتنجستن والتيتانيوم والنيوبيوم جدول (1 – 366)

ب. **سبائك أساسها النيكل:** ويطلق عليها Nimonics أي سبائك النيمونيك

وهي الأنواع (Nim75, Nim118, Nim115, Nim105, Nim100, (Nim95, Nim80A, Nim80

ج. سبائك أساسها الكوبلت: وهي حديثة في ابتكارها وتصلح للتشكيل بالسباكة الدقيقة.

د. سبائك أساسها الكروم: ويضاف إلى الكروم في هذه الحالة الحديد 15٪ والموليبدينم25٪ وتستخدم في مدى درجات الحرارة 900- 1000°C إذ تتميز بخواص مقاومة الزحف عند هذه الدرجات بجانب مقاومة الصدأ ولكنها لا تتمتع باللدونة الكافية عند درجات حرارة الجو.

ه. سبائك أساسها الموليبيديوم:هذه السبائك تتميز بخواص مقاومة زحف عظيمة (يضاف إليها في المعتاد 0.5٪ تيتانيوم) عند درجات الحرارة تبلغ نحو 1000°C

و. المركبات الفلز خزفية Cermets: وهي خلائط بين الفلزات والمواد الخزفية تصنع من صورة المسحوق بالتلبيد (الخبز Sintering) فتربط جزيئات مسحوق المواد الخزفية بمواد فلزية.

وأمثلتها: $70\ Al_2\ O_3 + 30\ Cr$

أو Tic + Ni + Cr (Binder)

تأثير العناصر المضافة على خواص الصلب:

الكربون: نسبته تتراوح في الصلب بين 0.03٪ إلى 2.07٪ كربون، مقاومة جهد الشد σR انفعال الكسرة δ صلادة برنيل HE N/mm^2

الحديد الطري الفقير في 270 – 28 – 100

الكربون Armco Iron

صلب 0.9٪ 100 – 2 - 360

وجميع أنواع الصلب الكربوني المحتوية على أكثر من 0.2٪ كربون قابلة للتسقية والمراجعة بالمعاملات الحرارية.

السيليكون: إذا وجد بنسب أعلى من 2٪ يخنق مجال δ ويحول الصلب الكربوني 0.1٪ إلى صلب فريتي وإذا وجد السيليكون بنسبة 3.5٪ يقلل قابلية التشكيل على البارد ولكنه يرفع مقاومة التآكل ودرجة حرارة المراجعة لذلك يضاف إلى صلب أعمدة المرفق وصلب العدة وإذا ارتفعت نسبة وجوده إلى 15٪ فإنه يكسب الصلب مقاومة كبيرة للاحتراق عند التعرض لدرجات الحرارة العالية ووجود السيليكون في الصلب يرفع $\frac{\text{حد المرونة}}{\text{مقاومة جهد الشد}}$ من 0.65 إلى حوالي 0.85 أي إكساب الصلب مرونة لحدود انفعال أكبر وهو الأمر المرغوب في صلب النوابض.

صلب النوابض الحلزونية في السيارات مكونة من:

- كربون 0.35٪- 0.8٪
- منجنيز 0.5٪ – 1٪
- سيليكون 1٪ - 2.5٪

وتزداد المقاومة الكهربائية وتقل مفاقيد التيارات الدوامية للصلب بإضافة السيليكون لغاية 4.5٪ مما يجعله صالحاً في ألواح الصاج الخاصة بالمحولات الكهربية ومن جهة أخرى فعيوب وجود السيليكون في الصلب هي أنه يجعله صعب التشكيل بالحدادة واللحام.

المنجنيز: يعتبر عاملاً مساعداً عند إضافته للصلب المسبوك ويتحد مع الأوكسجين مكوناً أكسيد المنجنيز وعند إضافته للصلب بنسبة أكبر من 0.1٪ يسمى الصلب صلب منجنيزي، ولا يضاف المنجنيز بنسبة كبيرة لأنه يكون مع السيليكون مركبات معدنية قصفة تجعل الصلب صعب التشغيل ومقاوماً للتآكل ووجود المنجنيز يسهل لحام الصلب المحتوى عليه.

ويستخدم الصلب المحتوى عليه في صناعة عجلات السكك الحديدية وقضبانها.

الفسفور: وجوده في نسب ضئيلة يرفع مقاومة جهد الشد وحد المرونة ومقاومة الصدأ، ولو أنه يقلل مقاومة احتمال الصدمات وقابلية اللحام (لا تتجاوز نسبة الفسفور + الكبريت 0.025) ووجود الفسفور بنسب مرتفعة 0.1٪ إلى 0.5٪ يجعل الصلب سهل الخراطة (بتكسير الرائش) مثل Automatic or free cutting steels.

الكبريت: غير مرغوب فيه ولو أنه يسهل قابلية اللحام في الصلب المحتوي على نسبة مرتفعة من الكربون، ووجوده بنسب أعلى من 0.3٪ يسمح بتكوين مركبات كبيريتيد الحديد.

النيتروجين: مهم لعميلة التقسية السطحية للصلب (عملية النتردة) بتسخين الصلب إلى درجة حرارة 500°C إلى 550°C لمدة 50 ساعة في جو النشادر (NH_3) الذي يتحلل وينقسم النيتروجين ذرياً ويتخلل ذرات الصلب من السطح الخارجي مكوناً مركبات معدنية مع الحديد المحتوي على الألمنيوم والكروم والفناديوم وغيرها وهذه المركبات تبقى مركبات صلدة على السلط أي تكسب الصلب صلادة سطحية أقصى عن صلادة المارتنسايت وتبقى الصلادة عالية حتى درجة حرارة 400°C

النيكل: بارتفاع نسبة وجوده في الصلب تنخفض درجة الحرارة الحرجة A ويستمر هذا حتى أنه يمكن الحصول على المارتنسايت بالتبريد في الهواء الجوي دون الحاجة إلى التسقية في سوائل التبريد وبوجود النيكل بكميات كافية نحصل على الصلب الأوستنتي في درجة حرارة الجو.

ووجود النيكل يؤثر في تغيير معامل التوصيل الحراري والحرارة النوعية ويزيد المقاومة الكهربائية للصلب (لذلك يستخدم في صناعة قضبان أو أسلاك

التسخين بالمقاومة الكهربائية) بالإضافة إلى الكروم الذي يقلل قابلية الاختراق ويؤثر وجود النيكل في الصلب على معامل التمدد فيستخدم في صناعة أدوات القياس وبندول الساعات والمزدوجات المعدنية لقياس درجات الحرارة Bimetal وفي عمليات التحكم.

الكروم: عنصر يضاف للصلب المقاوم للصدأ والأكسدة تأثير درجات الحرارة العالية إذا أضيف بنسب أعلى من 13٪.

التنجستن: يرفع مقاومة جهد الشد بمقدار $40N/MM^2$ لكل 1٪ تنجستن ويرفع مقاومة تأثير الحرارة ويجعل ترسيب المارتنسايت صعباً، لذلك فهو مناسب جداً في صلب العدة (المناشير وأدوات الكشط).

الموليبدينم: يرفع مقاومة جهد الشد وحد المرونة ومقاومة التآكل خاصة في درجات الحرارة العالية، وهو يناظر الكروم في مفعوله وتأثيره.

الحديد الزهر (الصب) Gast Iron:

يختلف حديد الزهر عن الصلب في ارتفاع نسبة الكربون والسيليكون وبعض الشوائب الأخرى، وبسبب ذلك تقل خواص لدونته (Plasticity) فلا يشكل بالحدادة ولا يسحب أو يكبس سواء على الساخن أو على البارد مثل الصلب بل يشكل بالسبك والقطع على آلات التشغيل Machining والهشاشة أهم عيوبه ولو أن احتمال الإجهادات للضغط قد يفوق الصلب وهو أرخص السبائك التجارية وله بعض ميزات أخرى مثل سهولة صهره وسبكه في أشكال كبيرة ومعقدة يصعب الحصول عليها بوسائل التشكيل الأخرى، وفي بعض الأنواع مثل حديد الزهر الأبيض تعلو القساوة ومقاومة التآكل لحد بعيد بينما يسهل تشكيل البعض الآخر بالقطع (حديد الزهر الرمادي) وهذا الأخير له خواص متميزة لخمد الاهتزازات أكثر من أي فلز آخر وهو غير حساس للشروخ وله خواص تحميلية عظيمة Bearing Properties.

ومن ناحية أخرى تجمع بعض الأنواع الأخرى مثل (Nodular & Malleable) بين اللدونة ومقاومة جهد الشد مما يرفع متانتها علاوة على مقاومة التآكل بفعل عوامل التعرية Corrosion.

وبوجه عام يمكن استخدام حديد الزهر في مجالات عديدة بالعناية بخلط مركباته وطرق سبكه ومعاملاته الحرارية.

أنواع حديد الزهر:

تتعدد أنواع حديد الزهر وتختلف في خواصها (الصلادة ومقاومة الاجتهادات، اللدونة) ومعظم هذه الأنواع تصنع بصهر حديد الزهر الخردة + الحديد الخام + الصلب الخردة + بعض السبائك الحديدية Ferralloys (مثلاً Ferrosilicon) في الأفران مثل الدست Cupola باستخدام وقود فحم الكوك ومساعد الصهر (حجر الجير) Lime stone وتعتبر هذه الأنواع من الزهر غير نظيفة نسبياً (مقارنة بالحديد الخام) إلا أنها تقل عنه في نسبة الكربون والكبريت والفسفور ويمكن إنتاج الحديد الزهر الفقير في الكربون في أفران الهواء (اللفح) ولو أن هذه الأفران مرتفعة في تكاليف إنشائها وتشغيلها وصيانتها لذلك يقتصر استخدامها على أنواع خاصة مثل اللينة (**Malleable**) وتستخدم الأفران الكهربائية في بعض الأحوال لنفس الغرض ويقتصر استخدامها هي والأفران الهوائية حالياً على تنقية الأنواع المنتجة في الفرن الدست حيث يسهل رفع الحرارة بها إلى درجات عالية يمكن عندها حرق معظم الشوائب الضارة بحديد الزهر، ويقتصر استخدام الأفران الكهربائية في السبائك على إنتاج أنواع(**Malleable & Nodular**) ويمكن تقسيم أنواع حديد الزهر تقسيماً يتبع أنواع الأفران المنتجة لها مثل حديد فرن الدست وحديد الأفران الهوائية والحديد المزدوج (Duplex) وهو حديد ينتج في أحد الأفران ويعاد تنقيته أو خلطه في أفران أخرى.

ومن ناحية أخرى يمكن تقسيم أنواع حديد الزهر حسب تركيبها ودرجة نقاوتها مثل حديد الزهر الفقير في الكربون والسيليكون أو حديد الزهر الغني بالكربون والفقير في الكبريت أو حديد الزهر النيكلي (المحتوي على النيكل) وهكذا...

وحتى لا يحدث تضارب في التسمية اتفق على توحيد تسمية أنواع حديد الزهر حسب تركيبها الفلزي (المتالورجي) وخواصها.

ومن المعروف أن الاختلاف الأساسي بين حديد الزهر والصلب هو في نسبة الكربون، فأنواع الصلب لا تتجاوز نسبة الكربون بها 2.07٪ حيث يوجد الكربون ذائباً في الحديد بينما تتجاوز نسبة الكربون في حديد الزهر أعلى من هذه النسبة دائماً (وقد ترتفع في بعض الأحوال إلى نحو 6.67٪ تركيب $Fe_3 C$ ولكون هذه النسبة مرتفعة (عن أكبر نسبة يمكن لحديد الأوستنايت أن يذيبها = 2.07٪ فإن بعض الكربون الزائد قد يوجد منفصلاً على صورة جرافيت في أشكال مختلفة بين حبيبات الحديد. ويشبه مخطط التوازن الحراري (الحديد Fe وكربيد الحديد ($Fe_3 C$)) وتلك الأنواع عديمة الذوبان في الحالة المتجمدة من ناحية اليمين ($Fe_3 C$) والذوبان المحدود في الحالة المتجمدة من ناحية اليسار (الأوستنايت السابق تكوينه في درجات الحرارة العالية المتحول إلى بيرلايت بالتبريد) مع تكوين مركب اليوتكتيك عند نسبة كربون 4.3٪ ودرجة حرارة $1147^{\circ}C$ والمسمى بمركب ليدوبرايت (Ledeburite) (نسبة إلى مكتشفه Ledebur) ولكون مركب اليوتكتيك (Ledeburite) ومركب اليوتكتويد (Pearlite) هي أهم المركبات الغالبة في حديد الزهر فأحياناً يطلق على الحديد اليوتكتيكي (Eutectiferous) وهذه المركبات هي المسؤولة عن تحديد خواص حديد الزهر وتفرقته عن الصلب إلى حد بعيد.

وعموماً يصعب إنتاج أنواع حديد زهر بنسب كربون منخفضة عن نحو 2٪ وكذلك أنواع حديد الزهر التي تفوق نسبة كربونها مركب اليوتكتيك 4.3٪ يعيبها ضعف خواصها الميكانيكية (قصفة)، لذلك فإن معظم أنواع حديد الزهر تتراوح نسبة الكربون بها بين 2.5٪- 3.7٪ وبالرغم من هذه الحدود الضيقة إلا أنها تشمل معظم الأنواع بخصوصها المتباينة.

وهناك عوامل أخرى تلعب دوراً هاماً منها:

1. وجود عناصر أخرى أو شوائب (خاصة نسبة السيليكون).
2. المعاملات الحرارية بعد السباكة.
3. معدل التبريد أثناء وبعد التجمد.

وبهذه العوامل يمكن تحديد نوع حديد الزهر الناتج:

وفيما يلي أهم أنواع حديد الزهر مقسمة حسب تركيبها وخواصها Structure:

1. حديد زهر أبيض White Cast Iron حيث يوجد الكربون غير الذائب على هيئة مركبات سمنتايت Fe_3C ويسمى كربون مرتبط.
2. حديد زهر رمادي (Gray Cast Iron): حيث يوجد بعض أو معظم الكربون غير الذائب على هيئة قشور من الجرافيت Graphite Flakes (كربون منفصل) على الأرضية Matrix من الصلب غير النقي.
3. حديد زهر مسقى Chilled Cast Iron حيث توجد طبقة من حديد الزهر الأبيض على سطح القطع المسبوكة بينما يكون قلب القطعة من الحديد الزهر الرمادي.
4. حديد زهر أرقش Mottled Cast Iron يتكون من مساحات صغيرة من حديد الزهر الرمادي على أرضية من حديد الزهر الأبيض (يمكن القول أن هذا النوع ينتج في صورة طبقة انتقالية بين غلاف من الزهر الأبيض والقلب الرمادي في حديد الزهر المسقى).
5. حديد زهر لين Malleable Cast Iron ويحتوي على كربون منفصل (جرافيت) مثل حديد الزهر الرمادي يكون في صورة متكررة (Sphereoids) كور غير منتظمة الشكل بدلاً من تشكيلها على هيئة قشور (Flakes) في حديد الزهر الرمادي ويمكن الحصول عليه بالمعاملة الحرارية الطويلة لأنواع معينة من حديد الزهر الأبيض.

6. حديد زهر ذو الجرافيت المتكور Nodular Cast Iron ويشبه حديد الزهر اللين في تكور الجرافيت به ولكن بشكل منتظم ودقيق ويمكن الحصول عليه بالتحكم في عملية السبك وبإضافة بعض العناصر الأخرى مثل المغنيسيوم أو السيريوم التي تساعد على تكور الجرافيت، ويتكون الجرافين في هذه الحالة أثناء التجمد دون الحاجة إلى معاملات حرارية إضافية بعد السبك كما هو الحال في حديد الزهر اللين.
7. سبائك حديد الزهر Alloy Cast Iron ولدراسة خواص هذه الأنواع واستخدامها يحق ان نفصل بعض ظروف العناصر الإضافية لتعديل شكل التركيب الميتالورجي أو لتعديل بعض الخواص الفيزيائية.

ولدراسة خواص هذه الأنواع واستخدامها يحق أن نفصل بعض ظروف تكوينها والعوامل الفعالة في ذلك كما يلي:

أولاً: حديد الزهر الأبيض White C.I

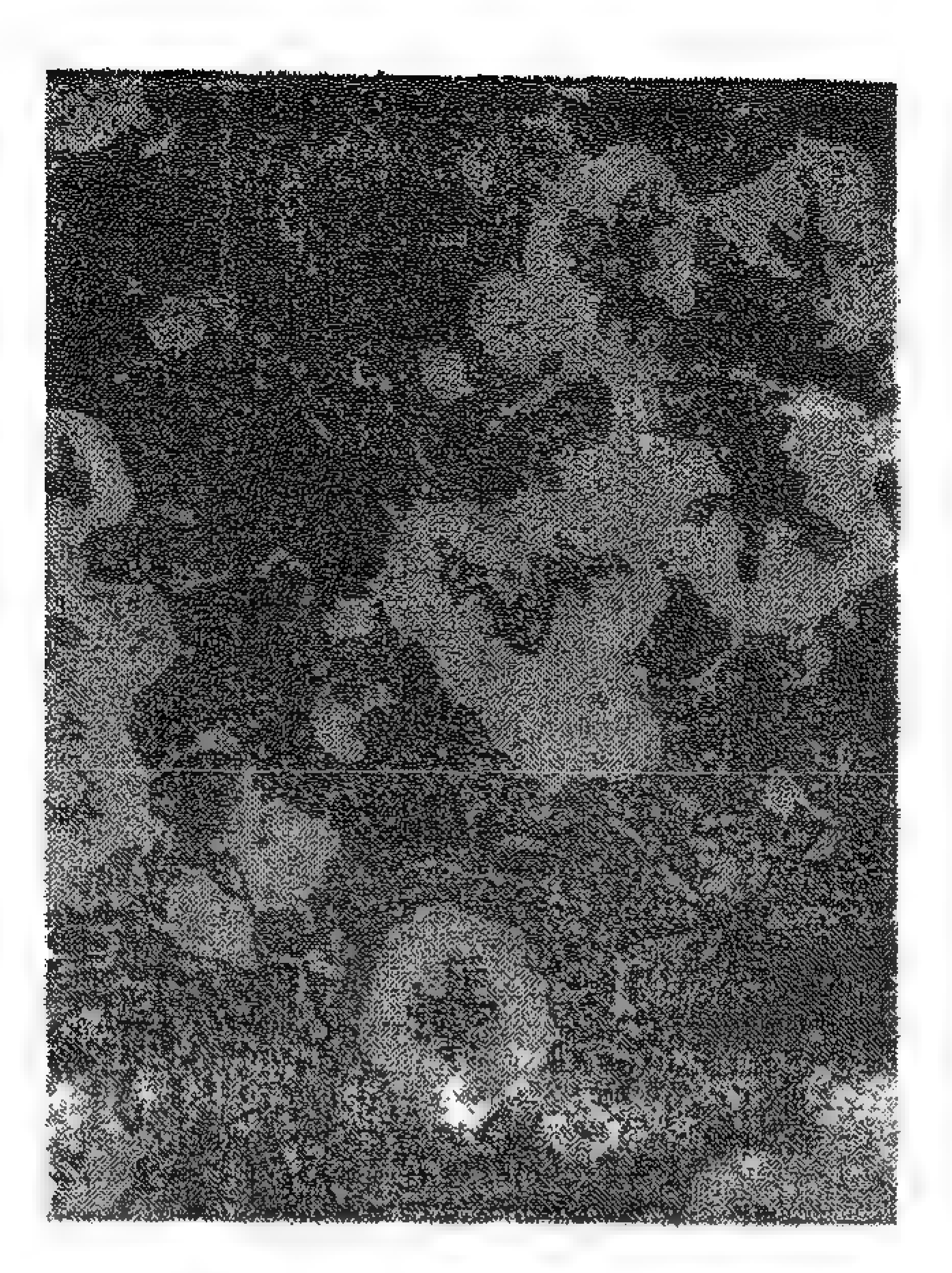
بالرجوع إلى مخطط الحديد – الكربون أو بمعنى آخر مخطط الحديد – كربيد الحديد $Fe\text{-}Fe_3$ يمكن دراسة ظروف ونتائج التبريد والذوبان والتغيرات اليوتكتيكية من المخطط ، حيث يوجد الحديد الزهر بصفة عامة على هيئة خليط بين بلورات الفيرايت وبلورات السمنتايت مع ظهور بعض الشوائب في صور مختلفة.

وحديد الزهر الأبيض كما سبق التنويه إليه يوجد به كربون مذاب في صورة مركب السمنتايت $Fe_3\ C$ وهذا الحديد يبدو في مقطعه أبيضاً نظيفاً ولامعاً بعض الشيء بعكس الحديد الرمادي الذي يبدو قاتم اللون (رمادياً) لوجود الجرافيت المنفصل موزعاً على مقطعه ولهذا السبب سمي كل منهما بمظهر لون مقطعه.

حديد الزهر اللين: Malleable Cast Iron

لاحظنا في تركيب حديد الزهر الأبيض أن طور السمنتايت (Fe_3C) اعتبر طوراً مستقراً أي لا يمكن تحوله إلى أطوار أخرى وذلك اعتبار غير صحيح على الإطلاق إذ أن طور السمنتايت تحت ظروف معينة (التبريد البطيء المعتاد) يمكن أن يتحلل إلى مركباته الأساسية الحديد والكربون أي أن السمنتايت في حد ذاته مركب غير مستقر Metastable فتعرض السمنتايت إلى درجات الحرارة العالية لزمن طويل يمكنه من الوصول إلى الحالة الأكثر استقرار بالتحلل إلى الحديد والجرافيت وهذا هو الأساس في إنتاج مسبوكات الحديد الزهر اللين من مسبوكات حديد الزهر الأبيض المحتوي على نسبة كبيرة من طور السمنتايت، وتتم في المعتاد عملية التحويل هذه بعد الانتهاء من عمليات السباكة فيعاد تسخين المسبوكات المصنوعة من حديد الزهر الأبيض ببطء شديد حتى لا تتعرض للتشرخ نتيجة للاجتهادات الحرارية وذلك إلى درجة حرارة تبلغ نحو $850^\circ C$ (أي أعلى من درجة حرارة اليوتكتويد $723^\circ C$ وأقل من درجة حرارة اليوتكتيك $1153^\circ C$) وذلك حتى لا تتعرض المسبوكات للاحتراق، وفي أثناء التسخين يتحول البيرلايت الموجود في حديد الزهر الأبيض إلى أوستنايت وهو الطور المتزن عند هذه الدرجة) الذي يذيب بدوره جزءاً من السمنتايت (أنظر المخطط) وتسمى درجة الحرارة هذه بدرجة حرارة التلين أو التطرية Malleabilizing Temperature وبعد انقضاء فترة وجيزة عند هذه الدرجة نجد أن طور الأوستنايت الذي تبلغ كميته نحو ثلثي السبيكة قد وصل حد تشبعه بالكربون فيبلغ نحو 1٪ كربون ويبقى في حالة اتزان مع السمنتايت Fe_3C المحتوي على 6.67٪ كربون وبالاحتفاظ بالمسبوكات عند درجة حرارة التطرية هذه لفترة أطول نجد أن السمنتايت يبدأ في التحلل إلى الحديد والجرافيت (كربون نقي) ويسري هذا التحلل على طور السمنتايت Fe_3C المكون لليوتكتيك (الليديبورايت) 4.3٪ كربون علاوة على الأوستنايت المشبع المحتوى على 1٪ كربون، ويترسب الجرافيت الناتج من التحلل في صورة إنباتات تنمو بمعدلات منتظمة وفي جميع الاتجاهات فتبدو في النهاية في أشكال كرات غير منتظمة أو بقع شكل (4- 4) وفي نفس

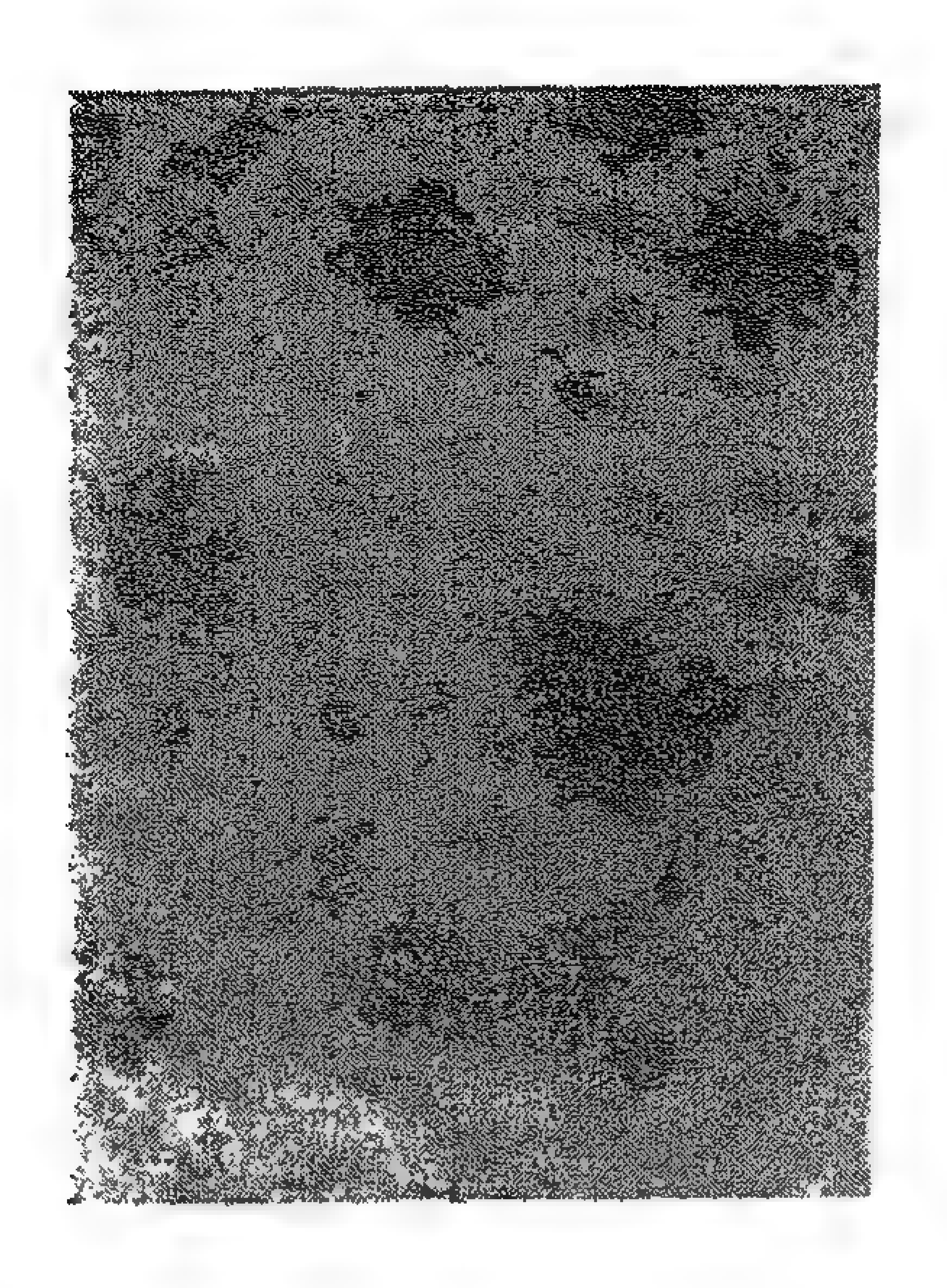
الوقت يتكون طور أوستنايت مع التحلل المذكور وينظم هذا الطور إلى طور الأوستنايت الموجود أصلاً.



أنواع حديد الزهر اللين Types of Malleable Cast Iron

أولاً: حديد الزهر الفريتي:

عند تبريد الزهر الطري من درجة حرارة التطرية Malleablising Temperature فإن ذلك يترتب عليه ترسيباً للسمنتايت فوق اليوتكتويدي Hypereutectoid بالاقتراب بدرجة الحرارة من الخط Ar_1 ويصاحب ذلك تكون سمنتايت بوتكتويدي مع فيرايت عند درجة حرارة Ar_1 أو دونها بقليل، والمعروف أن وجود الكربون الطري (المنفصل في صورة تجمعات في الحديد عند درجة حرارة التلين) يعجل بترسيب الجرافيت فإذا كان معدل التبريد منخفضاً فإن السمنتايت بكلا نوعيه (اليوتكتويدي وفوق اليوتكتويدي) يتحلل بمجرد تكوينه إلى كربون طري وإلى أوستنايت وفيرايت وتستغرق هذه المعاملة في العادة زمناً طويلاً (نحو يومين ونصف) وتصبح نتائجها النهائية هي الكربون الطري والفيرايت ولذلك يسمى حديد الزهر الناتج بالفريتي الطري Ferritic Malleable شكل (5 – 4)

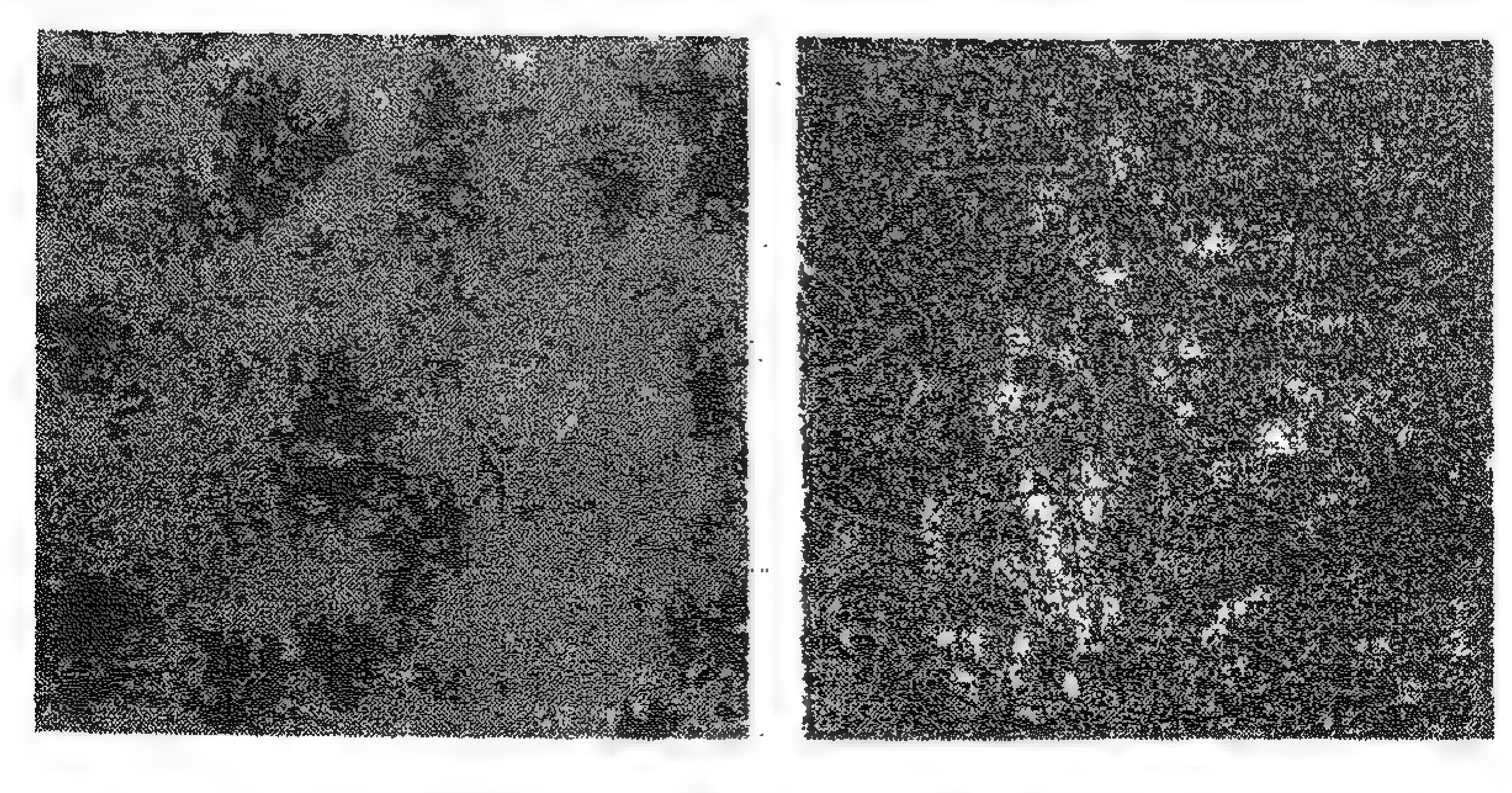


ولما كانت بنية هذا النوع من الفريتي تعتمد أساساً على وجود الفيرايت كأرضية موزع عليها بعض البقع من تجمعات الكربون الطري فإن خواص هذا النوع تتطبع بخواص الفيرايت إلى حد بعيد، فهو طري ولو أنه ضعيف نسبياً في مقاومته للشد إلا أنه من جانب آخر يتمتع بشيء من المتانة (مقاومة الصدمات) واللدونة بسبب توزيع الكربون فيه بشكل منتظم وفي تجمعات تكاد تكون كروية ولا يجب أن يفهم في هذا المقام أن خاصية اللدونة التي اكتسبها تكفي لتجعله صالحاً للتشكيل اللدن كالحدادة والدلفنة.... الخ إنما هي ترتفع فقط مقاومته للصدمات، ولدونته هذه نسبية بالنسبة لحديد الزهر الأبيض.

ويتميز حديد الزهر الفريتي بقابليته للتشكيل بالسبك لأشكال معقدة علاوة على سهولة تشغيله على آلات القطع Machining لوجود الجرافيت في بنيته (الجرافيت له خواص تزليقية جيدة)، ولهذه الأسباب فهو يستخدم في صناعة وصلات المواسير الزراعية والسيارات وبعض الماكينات الأخرى التي لا تتعرض لإجهادات قاسية أو تآكل بالاحتكاك أو قد يستخدم في الأجزاء التي لا يجوز استخدام الأنواع الأخرى فيها بسبب قصافتها وبالرغم من أن الزهر الفريتي الطري هو الأغلب شيوعاً في الأنواع الطرية إلا انه توجد بعض الأنواع الأخرى يجب التنويه عنها.

ثانياً: حديد الزهر البيرليتي Pearlitic C.I

عند تبريد حديد الزهر الفريتي بعد حفظه عند درجة حرارة التطرية ليومين ونصف يمكن أن يتم هذا التبريد ببطء ليتيح لكل السمنتايت فوق اليوتكتويدي وجزء من اليوتكتويدي للتحول إلى جرافيت، ويتركز هذا التحلل للسمنتايت في المناطق المجاورة للجرافيت الموجودة أصلاً، ولذلك تبدو بنية حديد الزهر تحت الميكروسكوب في درجة حرارة الجو محتوية على بقع الكربون الطري محاطة بغلاف من الفرايت دلالة على وجود منطقة من السمنتايت (في البيرلايت) تحللت تماماً إلى جرافيت (كربون طري) وأما أرضية البنية فهي من البيرلايت الغليظ (يبدو أحياناً متكوراً أو محبباً بسبب التبريد البطيء) دون أن يتحلل إلى جرافيت ويسمى هذا النوع Bull eye Malleable شكل (4- 4) وعند رفع معدل التبريد من درجة حرارة التطرية عن المعدل السابق اللازم لتكوين Bull eye malleable فإن حديد الزهر يتحول للنوع المعروف بحديد الزهر البرليتي الطري Pearlitic malleable cast iron وفيه يتحلل السمنتايت فوق اليوتكتويدي كله دون اليوتكتويدي، وتصبح البنية متكونة من كربون طري على أرضية من البرلايت بدلاً من الفيرايت، شكل (6- 4) ولذلك يتطبع هذا النوع بطابع بنيته الغالبة فهو أصلد من النوع الفيريتي وأهش نوعاً منه في التشغيل Machining وقد أشاع استخدام هذا النوع في السنين الأخيرة في أجزاء عديدة بسبب جمعه لخواص المتانة وقابليته للتشغيل.



شكل (6- 4)

حديد الزهر الرمادي Gray C.I

وهو شائع الاستخدام في الصناعة لرخص ثمنه وسهولة سبكه وتشكيله بالتشغيل ولارتفاع استعداده لخمد الاهتزازات أو كبتها Damping وانخفاض حساسيته للشروخ وارتفاع تحمله للضغط والتحميل Bearing.

وينتج بإضافة بعض العناصر لتشجيع تحلل السمنتايت إلى جرافيت + أوستنايت + فيرايت ثم التحكم في معدل التبريد ليعطيه كمية معينة من السمنتايت التي تتحلل أثنا التجمد والتبريد إلى المركبات المذكورة، وتصبح البنية المتكونة في درجات الجو عبارة عن فيرايت مختلط به (خليط ميكانيكي) جرافيت + بعض السمنتايت الذي لم يتحلل.

ويختلف حديد الزهر الرمادي عن حديد الزهر الطري في مبدأين أساسين:

أ. يتكون الجرافيت في حديد الزهر الرمادي أثناء التجمد والتبريد المعتاد للزهر دون الحاجة إلى معاملات حرارية بالتخمير عند درجة حرارة التليين لزمن كبير كما هو متبع في حديد الزهر الطري.

ب. يتطبع الجرافيت في حديد الزهر الرمادي بشكل قشور Flakes بينما يأخذ أشكالاً شبه كروية في حديد الزهر الطري، وهذه القشور تضر الحديد الرمادي من ناحية مقاومته للصدأ واتصافه بالقصافة.

وللتحكم بالانفصال الجرافيتي لإنتاج الحديد الرمادي نجد أن هناك ثلاثة عوامل رئيسية تؤثر في هذا المجال.

1. ارتفاع نسبة الكربون.
2. ارتفاع نسبة العناصر المشجعة على انفصال الجرافيت كالسليكون... الخ.
3. ارتفاع درجة الحرارة.

ولذلك فإنه لكبت الانفصال الجرافيتي (لإنتاج حديد الزهر الأبيض)

يستخدم حديد زهر فقير نسبياً في الكربون مع السيليكون والتبريد السريع، وباختيار مناسب للعوامل الثلاثة المذكورة يمكن التحكم في درجة انفصال الكربون وللتطور بها حتى الحصول على بنية فيتية كاملة لحديد الزهر الرمادي.

أثر العناصر المضافة على حديد الزهر:

النيكل يذوب في حديد الزهر في كلتا الحالتين المنصهرة والمتجمدة، وذوبانه في الحالة المتجمدة يساعد على تكوين بنية ذات حبيبات دقيقة لحديد الزهر وبالتالي إكسابه خواص المتانة، والنيكل يكسب حديد الزهر علاوة على ذلك خواص ميكانيكية ممتازة من ناحية الصلادة ومقاومته لاجتهادات الشد ومقاومة التآكل بفعل عوامل التعرية Corrosion بجانب سهولة التشغيل الميكانيكي Machinability.

حديد الزهر إلى النوع الرمادي دون النوع الأبيض، ويساعد النيكل على تخفيف الآثار الضارة للتبريد غير المنتظم خاصة في المسبوكات غير المنتظمة الثخانة من ناحية تكوين مركبات مختلفة وحبيبات متباينة الأحجام (صغيرة في القطاعات الرقيقة وغليظة في القطاعات الثخينة).

الكروم:

يساعد على الحد من كبر قشور الجرافيت في حديد الزهر ويساعد على تكوين بنية بيرليتية، وحديد الزهر المحتوي على الكروم مقاوم للبري بالاحتكاك وتحت درجات الحرارة المرتفعة نسبياً، علاوة على مقاومته للبلى بفعل عوامل التعرية والصدأ.

الموليبدينم:

يكسب بنية حديد الزهر بنية بيرليتية دقيقة الحبيبات أي يكسب حديد الزهر خواص ميكانيكية عالية بصفة عامة.

المنجنيز:

يحسن خواص التشغيل الميكانيكي إذا أضيف في حدود 1٪ أما إذا أضيف بنسب أعلى (من 1.25٪) فهو يحسن الخواص الميكانيكية لحديد الزهر بشكل ملحوظ.

الفناديوم:

يعمل على تكوين بنية بحبيبات دقيقة، ولكونه من مكونات الكربيد فإنه يضاف للحديد للحد من درجة الانفصال الجرافيت (الحر) حتى الدرجة المرغوبة وهو كالعناصر السابقة في أثره على الخواص الميكانيكية.

النحاس:

يساعد على الانفصال الجرافيتي للحصول على حديد الزهر اللين ويقتصر أثره على الخواص الميكانيكية على الأنواع المرتفعة في نسبة الكربون.

السيليكون:

وقد سبق إيضاح أثره على الانفصال الجرافيتي إذا وجد بنسبة محدودة، وقد يضاف السيليكون بنسب تصل إلى 17٪ لإنتاج الأنواع التي تقاوم فعل الأحماض (الأواني المستخدمة في المعامل الكيميائية) ولو أنها تكون قصفة إلا ان هذه الخاصية يمكن تحسينها بإضافة النيكل والكوم.

التيتانيوم والزركونيوم:

تعتبر عوامل مختزلة للأكاسيد لشراهة اتحادها بها، ولذلك فهي تضاف إلى حديد الزهر في ملاعق الصب قبيل السبك لتحسين خواص السيولة واختزال الأكاسيد.

الوحدة الخامسة

3-1 مقدمة:

يؤثر كل من المجال الكهرومغناطيسي والأجسام المشحونة داخل المادة بعضها على بعض وينتج عن ذلك الموصلية الكهربائية والخواص المغناطيسية.

يكون للأجسام المشحونة (الأيونات والإلكترونات حركة تذبذبية ذات طبيعة موجية عادة. ويضيف كل من المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي قوى جذب اتجاهية للأجسام المتحركة هذه فتفقدها الصفة العشوائية البحتة في المركز. وتتأثر الخواص المغناطيسية والكهربائية بالعوامل التالية:

1. طاقة الإلكترونات في الغلاف التكافؤي للذرات (المدار الخارجي).
2. الدوران اللولبي للإلكترونات في الذرات.
3. التركيب البلوري للمواد.

تعتبر سهولة نقل المواد للتيار الكهربائي واحدة من أهم ميزات المعادن. ويربط قانون أوم (Ohm's Law) التيار (Current I) أو معدل مرور الشحنة مع فرق الجهد كما يلي:

$V = IR$ ....(5-1

حيث :

R : مقاومة المادة التي يمر خلالها التيار ووحدتها أوم (O).

I : شدة التيار ووحدتها امبير (A).

V : فرق الجهد ووحدتها فولت (V).

2-5 الموصلية الكهربائية (Electrical Conductivity):

الموصلية الكهربائية ببساطة هي عكس الممانعة أو المقاومة. وهنالك ثلاثة طرق يتم بواسطتها توصيل التيار الكهربائي في المواد الصلبة:

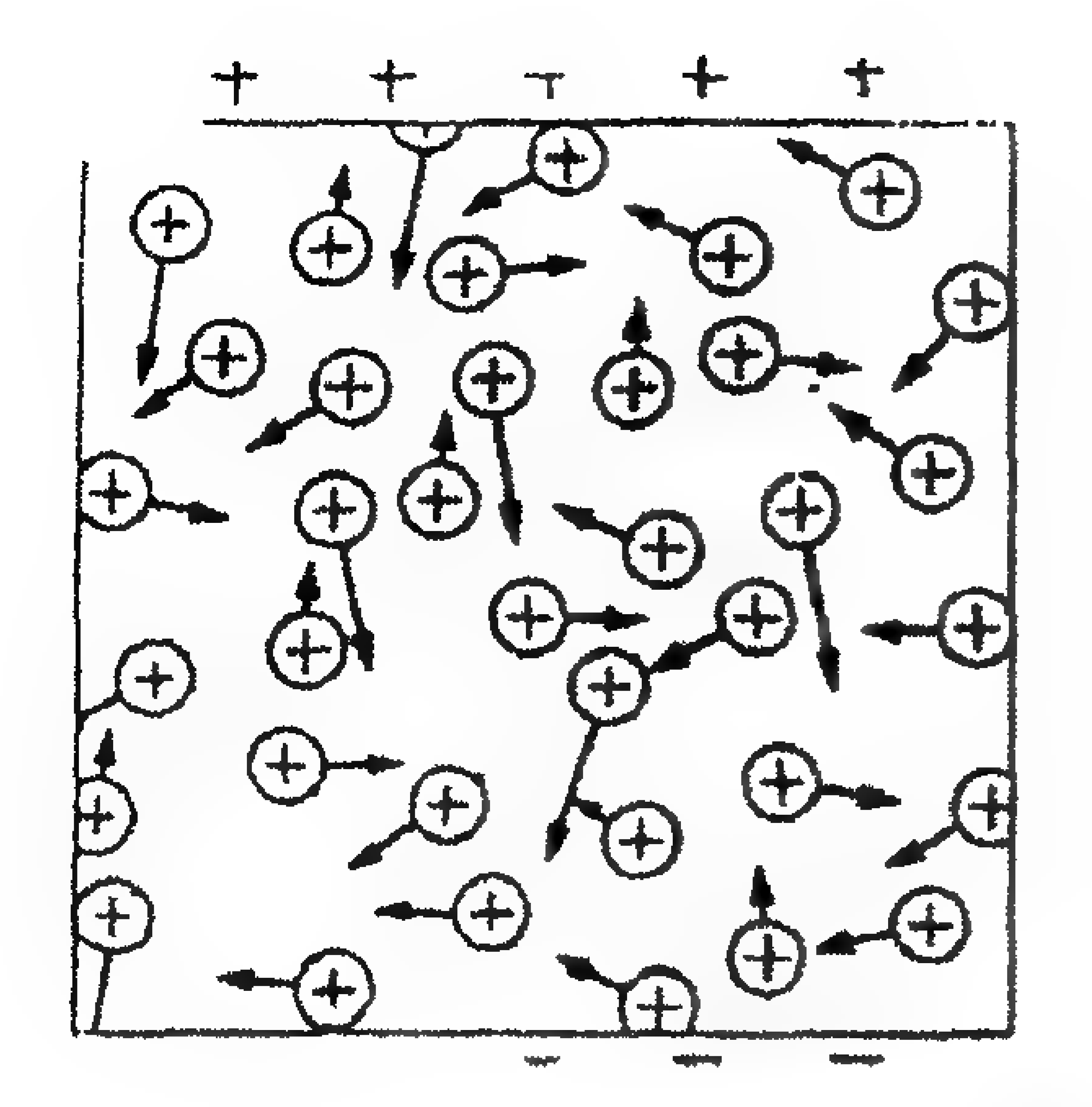
1. حركة الأيونات .
2. حركة الإلكترونات .
3. حركة الفراغات الإلكترونية (Electronic Vacancy).

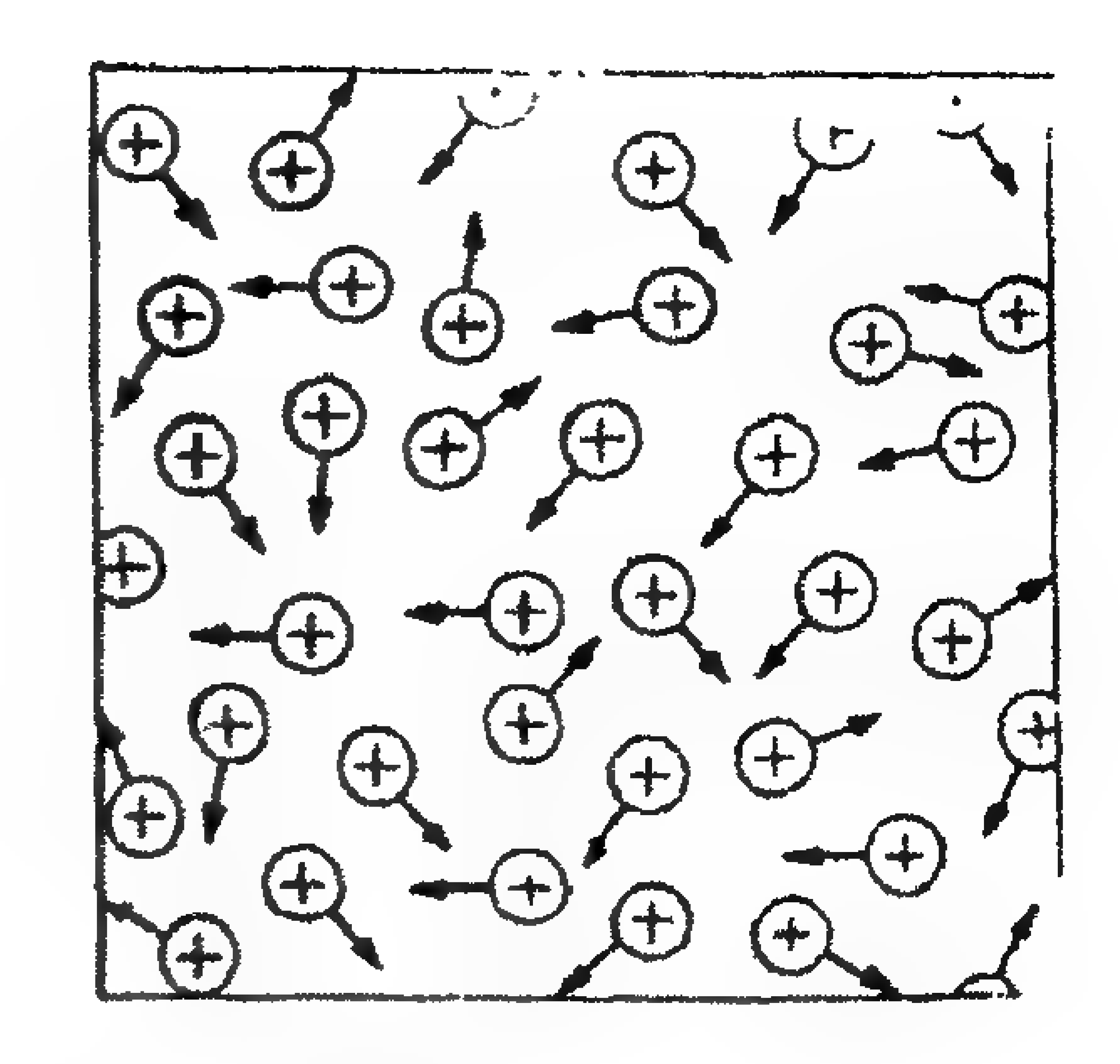
تتكون الفراغات الإلكترونية في التراكيب البلورية للمواد ذات الأواصر التساهمية في حالة فقدان أحد الإلكترونات من المزدوج الإلكتروني للآصرة. كما يتكون الفراغ الإلكتروني في المواد ذات الأواصر الأيونية عند كسر الآصرة الأيونية فيتكون في هذه الحالة إلكترون طليق (Free Electron) وفجوة إلكترونية (Electron Hole) وتعتبر الفجوة الإلكترونية كشحنة موجبة رغم أنها في الحقيقة نقص في الشحنة السالبة ضمن التركيب.

5-2-1 المواد الأيونية:

تعتمد الموصلية الكهربائية في المواد الأيونية على حركة الأيونات كما في الشكل (1- 5) وبما أن لكل أيون أواصر قوية تربطه مع أقرب الأيونات المجاورة له لذا فإن الموصلية الكهربائية للمواد الأيونية تكون محدودة. وتزداد الموصلية هذه بارتفاع درجة الحرارة عندما تصبح الأيونات أكثر حركية.

في المواد الأيونية المنصهرة تكون الأيونات حرة في تغيير مواقعها وغير مرتبطة مع الأيونات المجاورة لها ولكن رغم هذا تكون الموصلية الكهربائية فيها قليلة بسبب الوزن الكبير للأيون.





شكل (1- 5) حركة الأيون الموجب

أ) الحركة العشوائية للأيونات.
ب) عند وجود مجال كهربائي خارجي تكون محصلة حركة الأيونات الموجبة باتجاه القطب السالب.

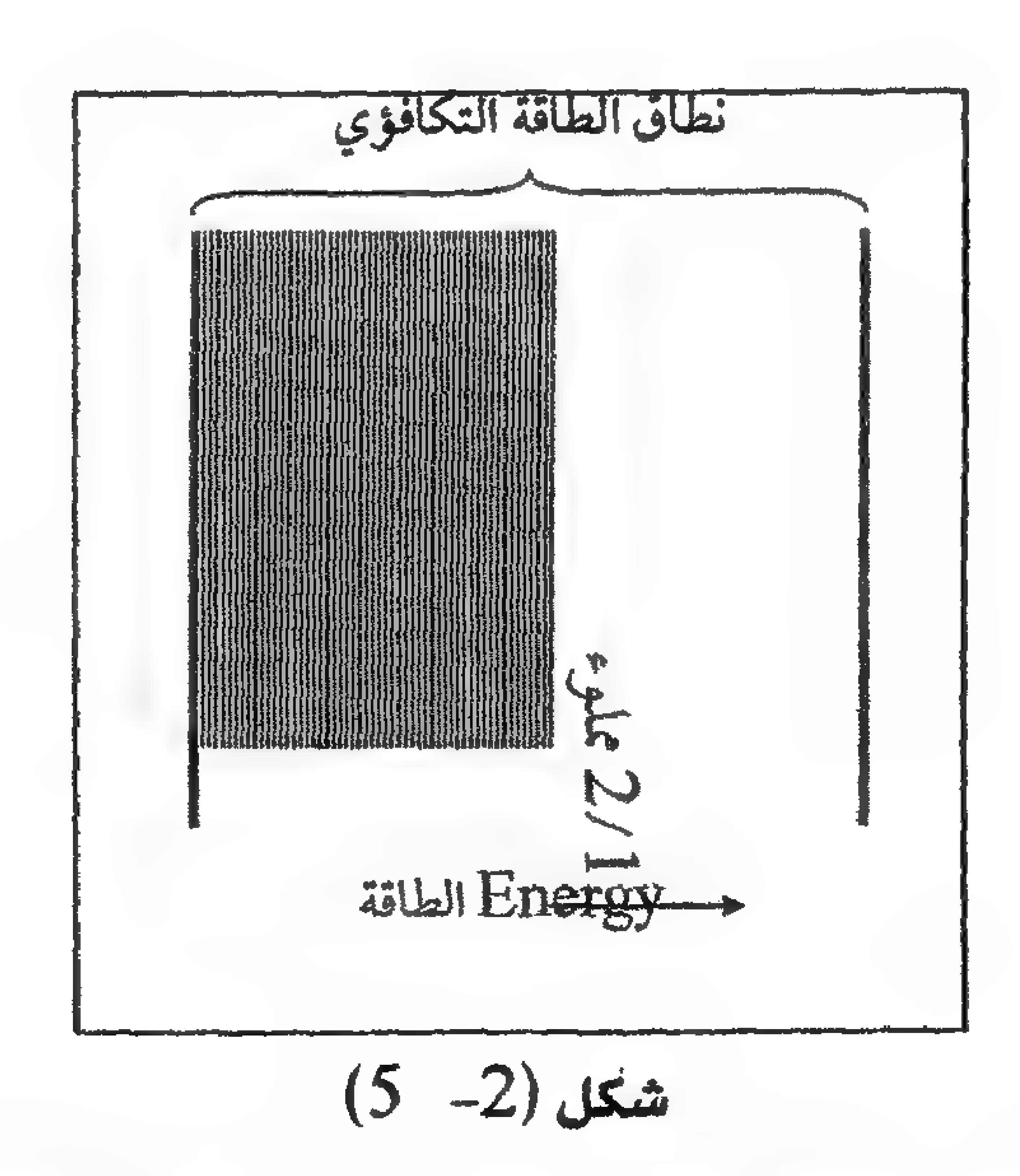
5-2-2 المواد الفلزية:

في الفلزات تسهم إلكترونات التكافؤ ذات الطاقة العالية (الإلكترونات البعيدة عن النواة) في عملية التوصيل الكهربائي. إذ أن هذه الإلكترونات لا تكون مرتبطة مع ذرة معينة داخل التركيب البلوري، ويمكنها التنقل ضمن التركيب البلوري لذا تكون فيما يشبه السحابة الإلكترونية.

عندما تكون الذرات منفردة (كما هو الحال في الغازات) تحتل الإلكترونات حول النواة مستويات طاقة معينة وعند إثارة هذه الإلكترونات تنتقل من مواقعها ذات الطاقة المنخفضة (القريبة من النواة) إلى مستوى طاقة أعلى (أبعد عن النواه) عن طريق امتصاص الطاقة. وفي هذه الحالة تكون الذرة في حالة تهيج وغير مستقرة. لذا تعود الإلكترونات الحرة في نهاية الأمر إلى مداراتها السابقة ذات الطاقة الأدنى وهكذا تعطي الذرات فارق الطاقة على شكل إشعاعات كهرومغناطيسية. وتكون الطاقات المتحررة بسبب رجوع الإلكترونات إلى الحالة المستقرة موجبة وبأطوال مختلفة (اعتماداً على كمية الطاقة المتحررة) وهذا هو أساس خطوط الطيف الناتجة من الأبخرة شديدة التوهج.

أما في المواد البلورية الصلبة فتكون الذرات أكثر تقارباً، وتكون مستويات الطاقة للإلكترونات فيها غير محددة بوضوح عدا تلك القريبة من النواة. فلا يمكن إزاحة الإلكترونات القريبة من النواة إلا عند إثارتها بطاقات عالية جداً كتلك الناتجة عن أشعة أكس أو أشعة جاما. أما الإلكترونات البعيدة عن النواة فيمكن إزاحتها بسهولة بواسطة الحرارة أو الضوء، وكذلك بواسطة المجالات الكهربائية والمغناطيسية وتكون مدارات الإلكترونات البعيدة عن النواة غير محددة بوضوح، بل تكون منتشرة ضمن مجالات ضيقة ولكل من هذه المجالات طاقة محددة تسمى نطاقات الطاقة (Energy Bands). وتكون الإلكترونات الأبعد عن النواة ذات نطاق الطاقة الأعلى ويسمى نطاق التكافؤ ويحتوي على إلكترونات التكافؤ.

يكون هناك نطاق طاقة لكل عد تكافؤي للعنصر. فالعنصر ذو العدد التكافؤي واحد يكون له نطاق تكافؤي واحد. والعنصر ذو العدد التكافؤي اثنان يكون له نطاقا تكافؤ، وهكذا ويحتوي كل نطاق على عدد من مستويات الطاقة بنفس عدد ذرات البلورة. وبما أن مستوى الطاقة الواحد يحتوي على إلكترونين باتجاه دوران لولبي متعاكس، لذا فالعناصر ذات العدد التكافؤي واحد (الفلزات القوية كالصوديوم والبوتاسيوم) يكون نطاق الطاقة لها نصف مملوء كما في الشكل (2- 5).

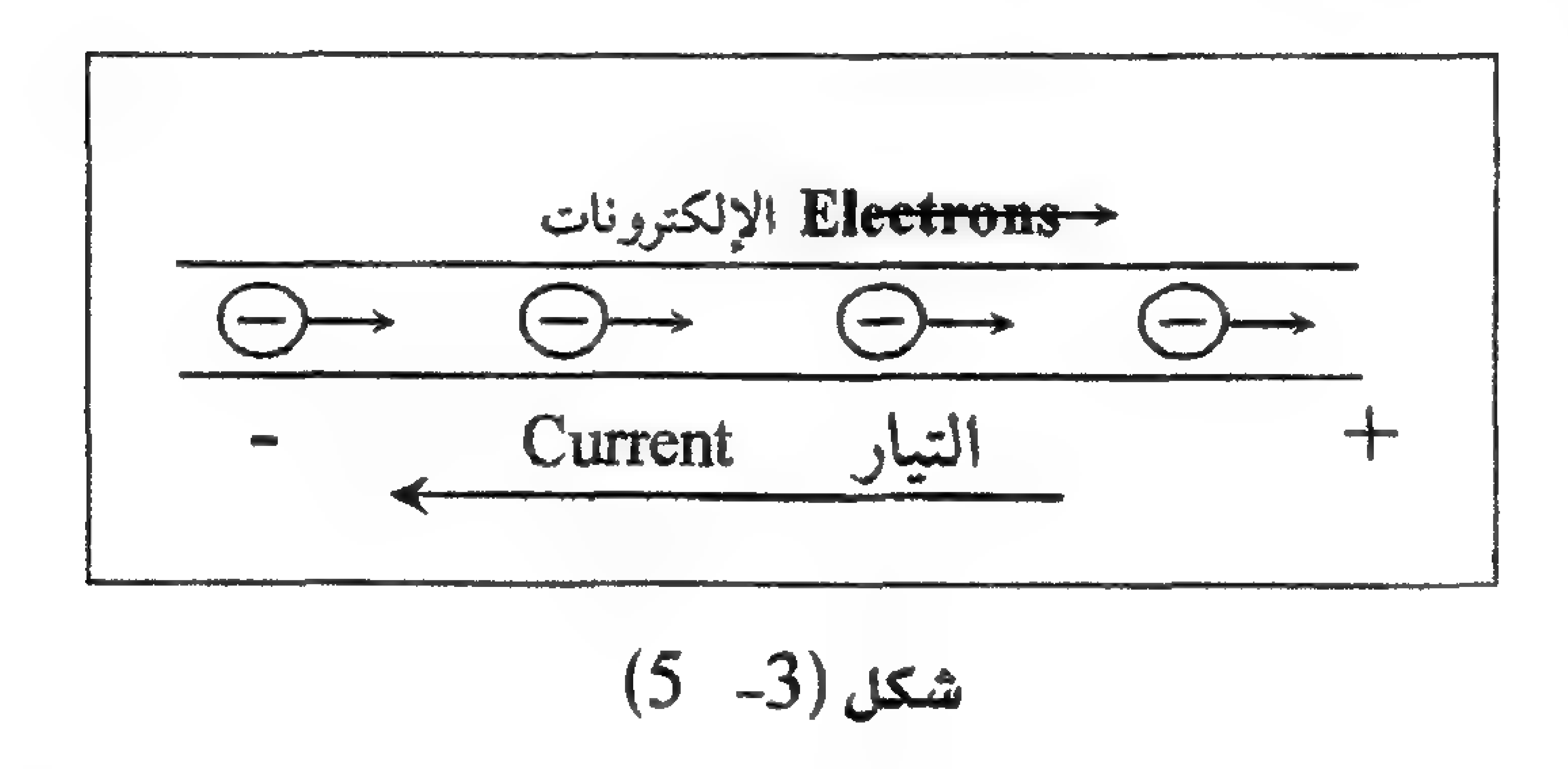


شكل (2- 5)

نطاق الطاقة التكافؤي للمواد القلوية ذات العدد التكافؤي الواحد

ولتغيير مواقع الإلكترونات من مواقع ذات طاقة منخفضة إلى مواقع ذات طاقة أعلى تحتاج الإلكترونات إلى طاقة إضافية، وتكون هذه الطاقة الإضافية قليلة للفلزات القلوية وذلك لوجود مستويات شاغرة في نفس النطاق الأول.

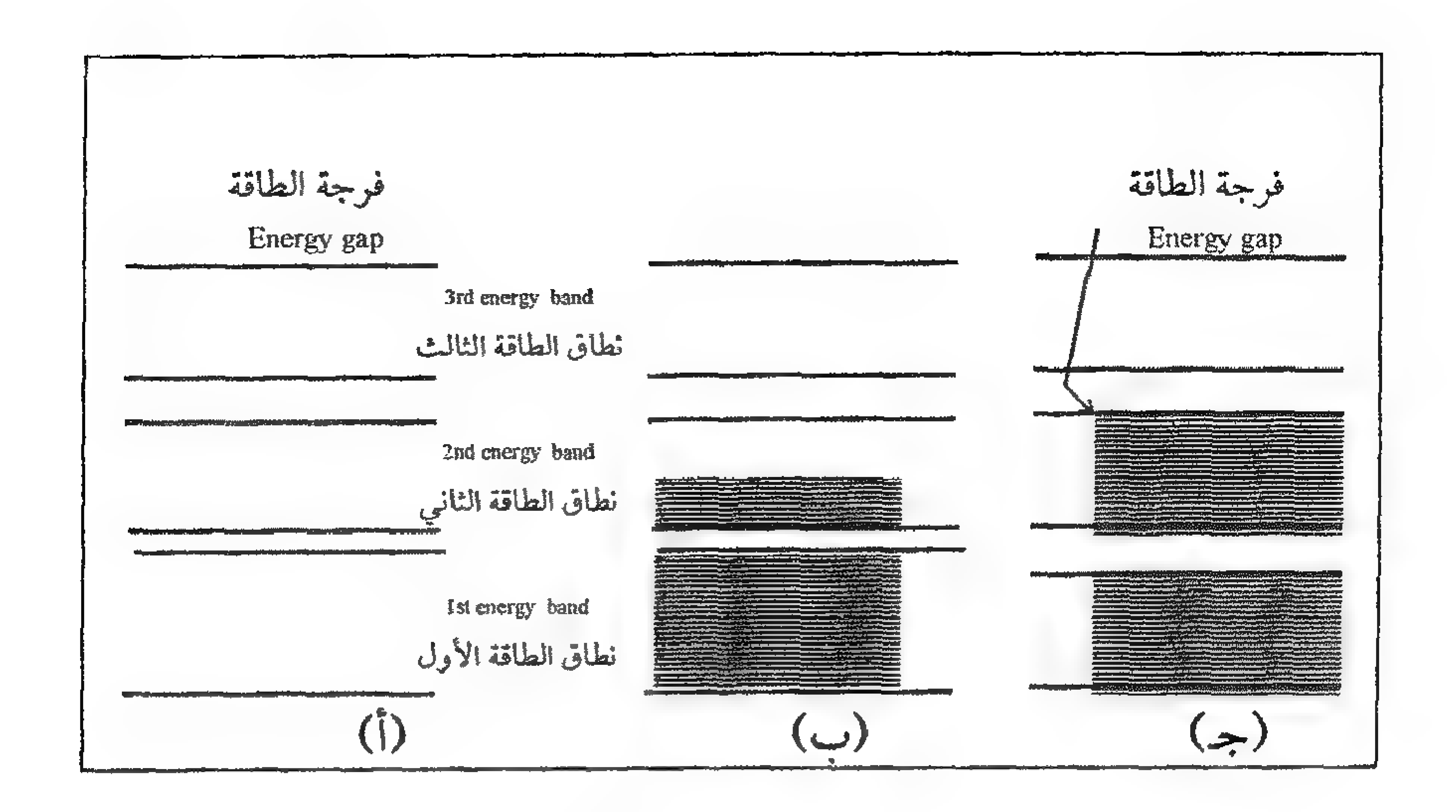
ويمكن للمجال الكهربائي رفع الإلكترونات إلى مستويات أعلى في نفس النطاق. حيث تكون حركة الإلكترونات عشوائية بدون وجود التيار الكهربائي الخارجي ولكنها تصبح ذات محصلة باتجاه القطب الموجب مع وجود تيار كهربائي خارجي كما في الشكل (3- 5).



شكل (3- 5)

أما في عنصر السيليكون الذي يحتوي على أربعة إلكترونات تكافؤية فتكون جميع مستويات الطاقة الأول والثاني له مشغولة كلياً كما في الشكل (4- 5).

لذا فإن تغير موقع إلكترون في ذرة السليكون إلى مستوى طاقة أعلى يتطلب إضافة طاقة عالية جداً وهذا يحتاج إلى مجال كهربائي قوي جداً. لذا يعتبر السيليكون النقي ذو مقاومة عالية للتيار الكهربائي ويعتبر عازلاً.

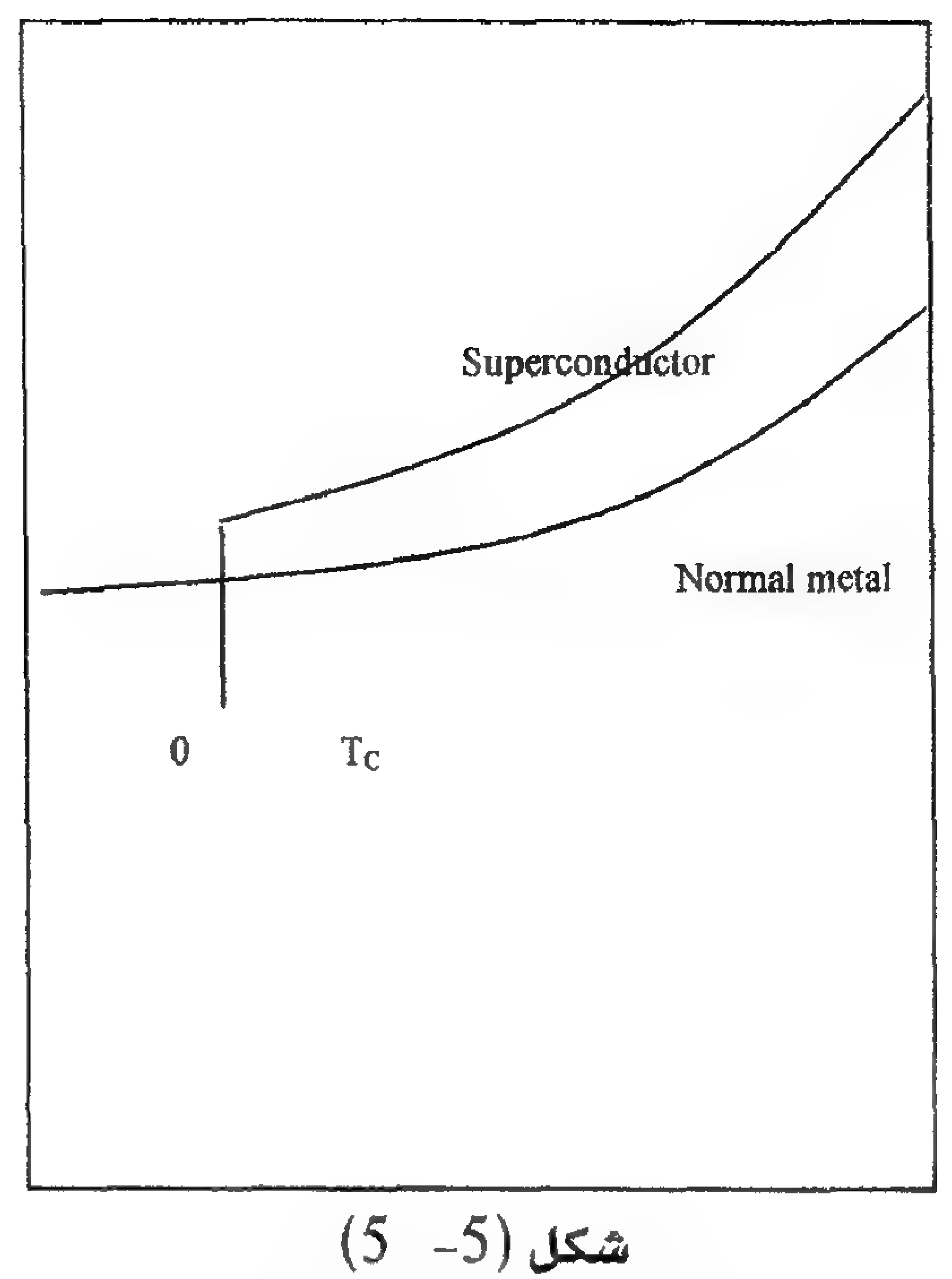


شكل (4- 5)

5-3 فرط الموصلية (Super Conductivity):

تعتبر فرط الموصلية ظاهرة كهربائية وتستخدم المواد المفرطة الموصلية في صناعة المغانط القادرة على توليد مجالات مغناطيسية عالية.

عند تبريد المعادن عالية النقاوة لدرجة حرارة تقاريت (O)°K تنخفض مقاومتها الكهربائية تدريجياً لتصل إلى قيمة منخفضة جداً وتصبح هذه إحدى مزايا المادة. وهنالك القليل من المعادن التي تهبط مقاومتها إلى الصفر وتبقى كذلك عند التبريد الإضافي، وتسمى المواد التي تسلك هذا السلوك مواد مفرطة الموصلية. وتمسى درجة الحرارة التي تصبح عندها المادة مفرطة الموصلية درجة الحرارة الحرجة (T_c)، كما في الشكل (5- 5) . لاحظ أن مقاومة المادة المفرطة الموصلية قد أصبحت صفر عند درجة حرارة (O°)K ولم تصبح كذلك للمواد الاعتيادية.



شكل (5- 5)

اعتماد الموصلية على درجة الحرارة

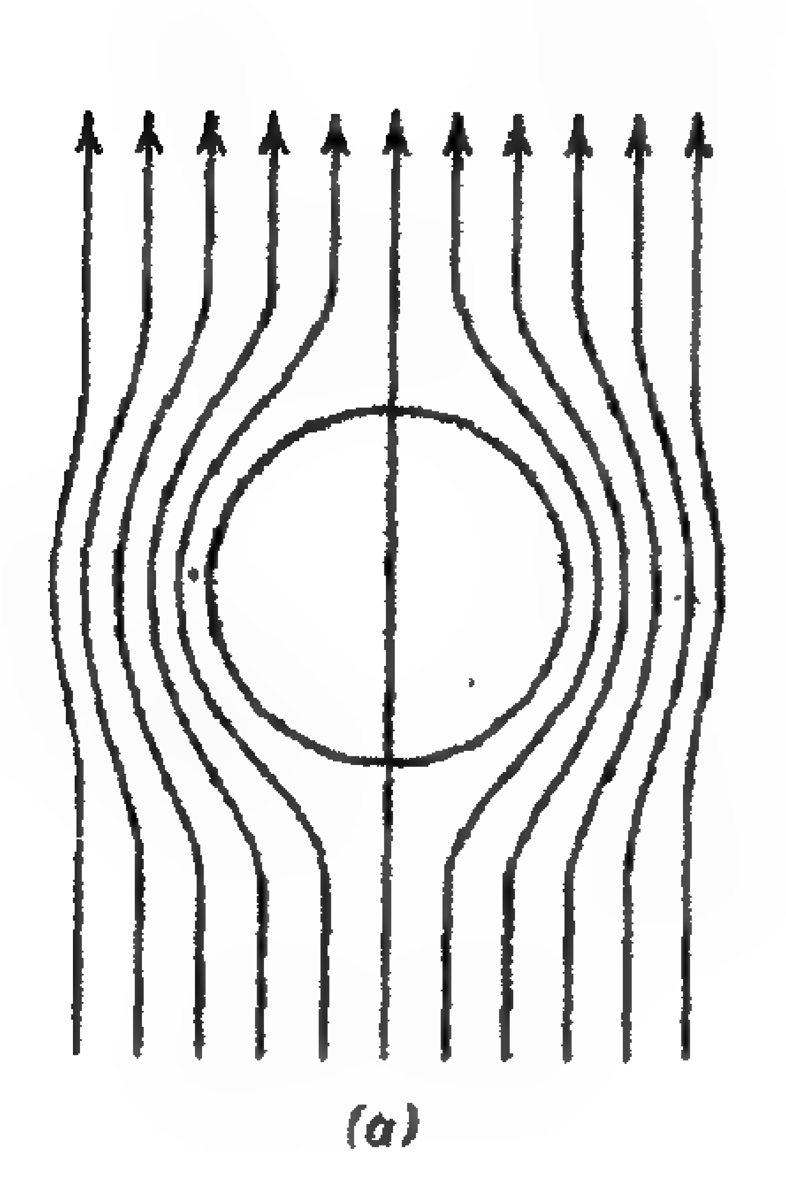
وتختلف (T_c) من معدن إلى آخر ولكنها تتراوح بين أقل من $(1)^{\circ}K$ إلى $(20)^{\circ}K$ للمعادن وسبائكها.

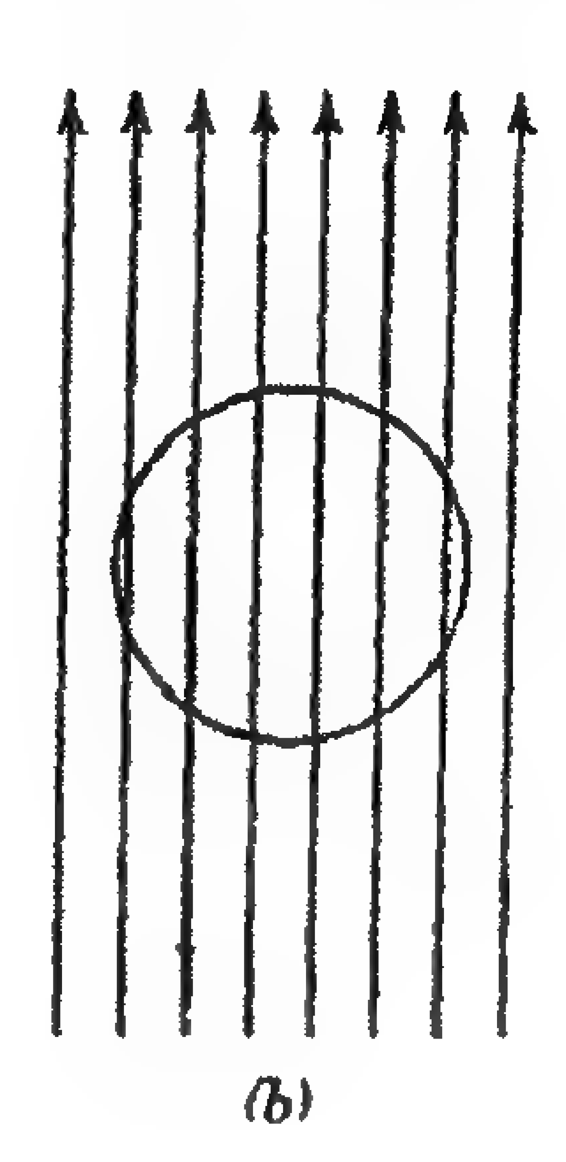
وقد تبين حديثاً أن بعض أنواع أكاسيد السيراميك لها درجة حرارة حرجة تزيد على $(100)^{\circ}K$. وعند تعريض المعادن المفرطة الموصلية إلى مجال مغناطيسي قوي تتوقف ظاهرة فرط الموصلية عند درجات حرارة أدنى من (T_c) ويسمى هكذا مجال بالمجال المغناطيسي الحرج الذي يعتمد على درجة الحرارة وينقص هذا المجال المغناطيسي بارتفاع درجة الحرارة.

تقسم المواد مفرطة الموصلية إلى نوعين حسب سلوكها:

النوع الأول (Type I) يكون دیامغناطیسیاً (أي أن المجال المغناطيسي لا يمر خلال جسم المعدن) تحت ظروف فرط الموصلية، وتسمى هذه الظاهرة تأثير ميسنر (Meisnner effect) . كما في الشكل (أ) (6- 5) . فعند زيادة المجال

المغناطيسي تبقى المادة ديامغناطيسية حتى يتم الوصول إلى المجال المغناطيسي الحرج وعند هذه النقطة يصبح التوصيل اعتيادياً وتبدأ مقاومتها الكهربائية بالظهور ويخترق المجال المغناطيسي جسم المادة (شكل (ب) (6- 5) وينتمي الألمنيوم والرصاص والزئبق إلى هذا النوع من مفرطات الموصلية.





شكل (6- 5) تأثير ميسنر

أما النوع الثاني (Type II) فيكون ديامغناطيسياً عند المجالات المغناطيسية المنخفضة، ويحدث انتقال المعدن من حالة فرط الموصلية إلى التوصيل الاعتيادي بصورة تدريجية وهذا يحدث بين المجال المغناطيسي الأدنى الحرج و المجال المغناطيسي الأعلى الحرج.

النوع الثاني (Type II) مفضلاً في الاستخدام على النوع الأول لغالبية التطبيقات العملية بسبب ارتفاع درجة حرارتها الحرجة والمجال المغناطيسي الحرج لها. وتستخدم مفرطات الموصلية في عدة مجالات منها:

1. نقل الطاقة الكهربائية (لأن الطاقة المفقودة تكون قليلة جداً وبالتالي لا يكون هناك ارتفاع في درجة الحرارة).
2. المغانط لأجهزة تسارع الجسيمات ذات الطاقة العالية.
3. الفاصل - الموصل السريع (High Speed Switch) وناقلات الإشارة للحواسيب.

4. القطارات المغناطيسية السريعة.

ويبين الجدول (1- 5) درجة الحرارة الحرجة والمجال المغناطيسي الحرج لبعض المواد.

جدول (1- 5)

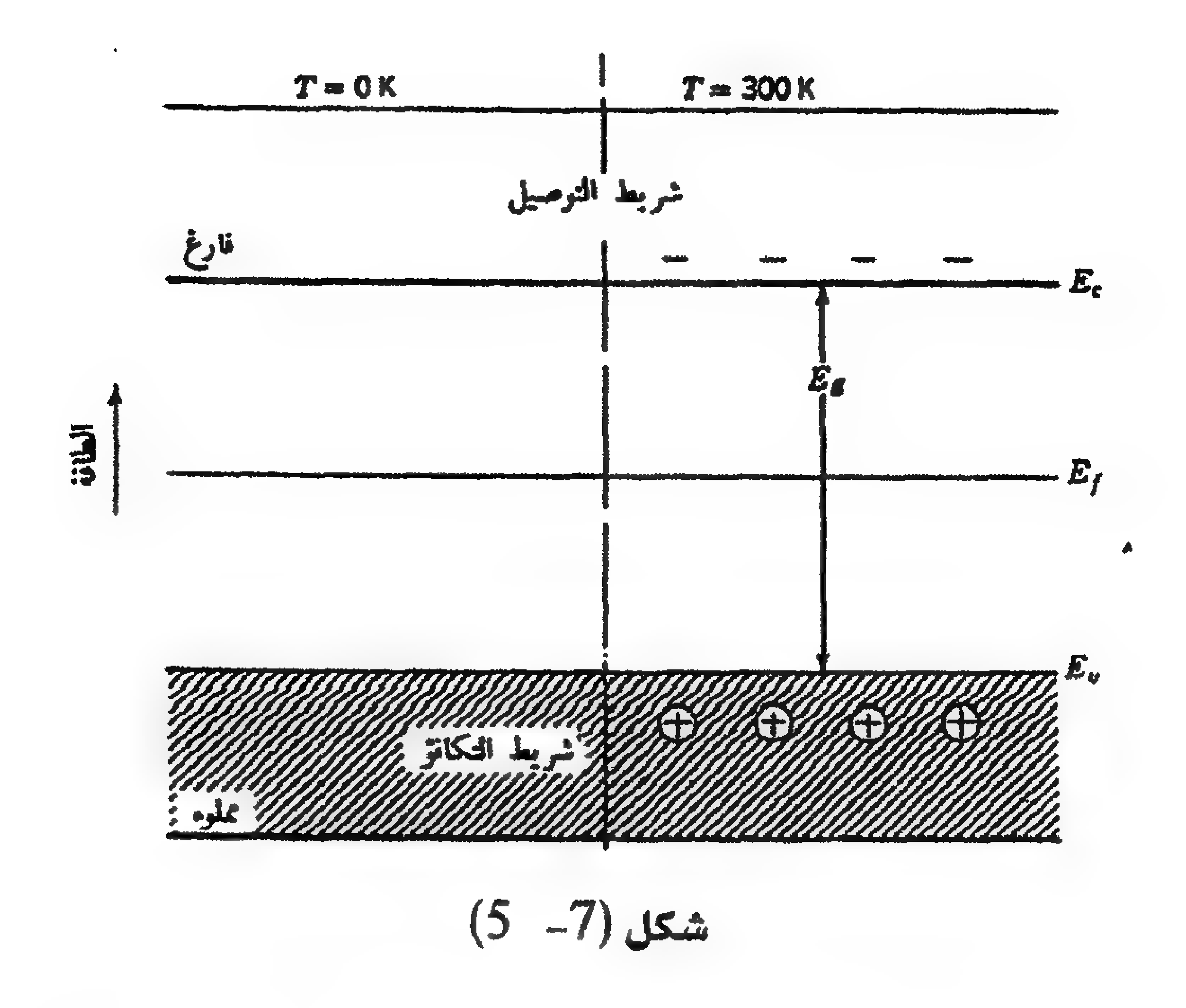
درجة الحرارة الحرجة والمجال المغناطيسي لبعض المواد مفرطة الموصلية.

Material	Critical Temperature T_c(K)	Critical Magnetic Flux Density Bc (tesla)[a]
	Elements[b]	
Tungesten	0.02	0.0001
Titanium	0.40	0.0056
Aluminium	1.018	0.0105
Tin	3.72	0.305
Mercury (α)	4.15	0.0411
Lead	7.19	0.0803
	Compounds Alloys[b]	
Nb-Ti alloy	10.2	12
Nb-Zr alloy	10.8	11
$PbMo_6S_8$	14.0	45
V_3Ga	16.5	22
Nb_3Sn	18.3	22
Nb_3Al	18.9	32
Nb_3Ge	23.0	30
	Ceramic Compounds	
$YBa_2Cu_3O_7$	92	-
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110	-
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125	-
$HgBa_2Ca_2Cu_2O_8$	153	-

5-4 نصف الموصلية (Semiconductivity):

إذا أخذنا شبيكة بلورة مثل السليكون نجد أن جميع إلكترونات التكافؤ الأربع ترتبط معاً مكونة روابط تساهمية. وتقع نطاقات التكافؤ التي تربط البلورة معاً في أعلى شريط طاقة مملوء، يطلق عليه شريط التكافؤ، وينفصل شريط التكافؤ عن الشريط الفارغ الذي يعلوه، والمسمى شريط التوصيل، بواسطة فجوة طاقة E_g شكل (7- 5) جدير بالذكر أن فجوة الطاقة هي خاصية ناتجة عن الشبيكة وحدها وتختلف بدرجة كبيرة باختلاف البلورات.

إن انتقال إلكترون ما من شريط التكافؤ (valence band) إلى شريط التوصيل (conduction band) يتطلب طاقة تهيج عالية ليتغلب على حاجز الجهد (potential barrier) لنطاق الطاقة المحرم (forbidden) . وقد وجد أن بعض الحالات أن تسليط الحرارة أو الضوء يعطي بعض الإلكترونات الواقعة في شريط التكافؤ حرارة تكفي لتهيجها ونقلها عبر النطاق المحرم إلى شريط التوصيل (شكل 7- 5) . وتصبح هذه الإلكترونات الواقعة في شريط التوصيل حرة الحركة عند تطبيق المجال الكهربائي. ويترك كل إلكترون ينتقل من شريط التكافؤ إلى شريط التوصيل وراءه ثقباً (hole) في شريط التكافؤ. ويدل اسم "الثقب" على وجود شاغرة أو فجوة متحركة في التركيب الإلكتروني لشريط التكافؤ لنصف الموصل. وتنتج هذه الشاغرة عن إزالة إلكترون واحد من شريط التكافؤ. ويمكن اعتبار الثقوب في معظم الحالات بأنها شحنات موجبة توجد داخل البلورة ولها شحنة فعالة وكتلة فعالة تماثل شحنة وكتلة الإلكترون.



شكل (7- 5)

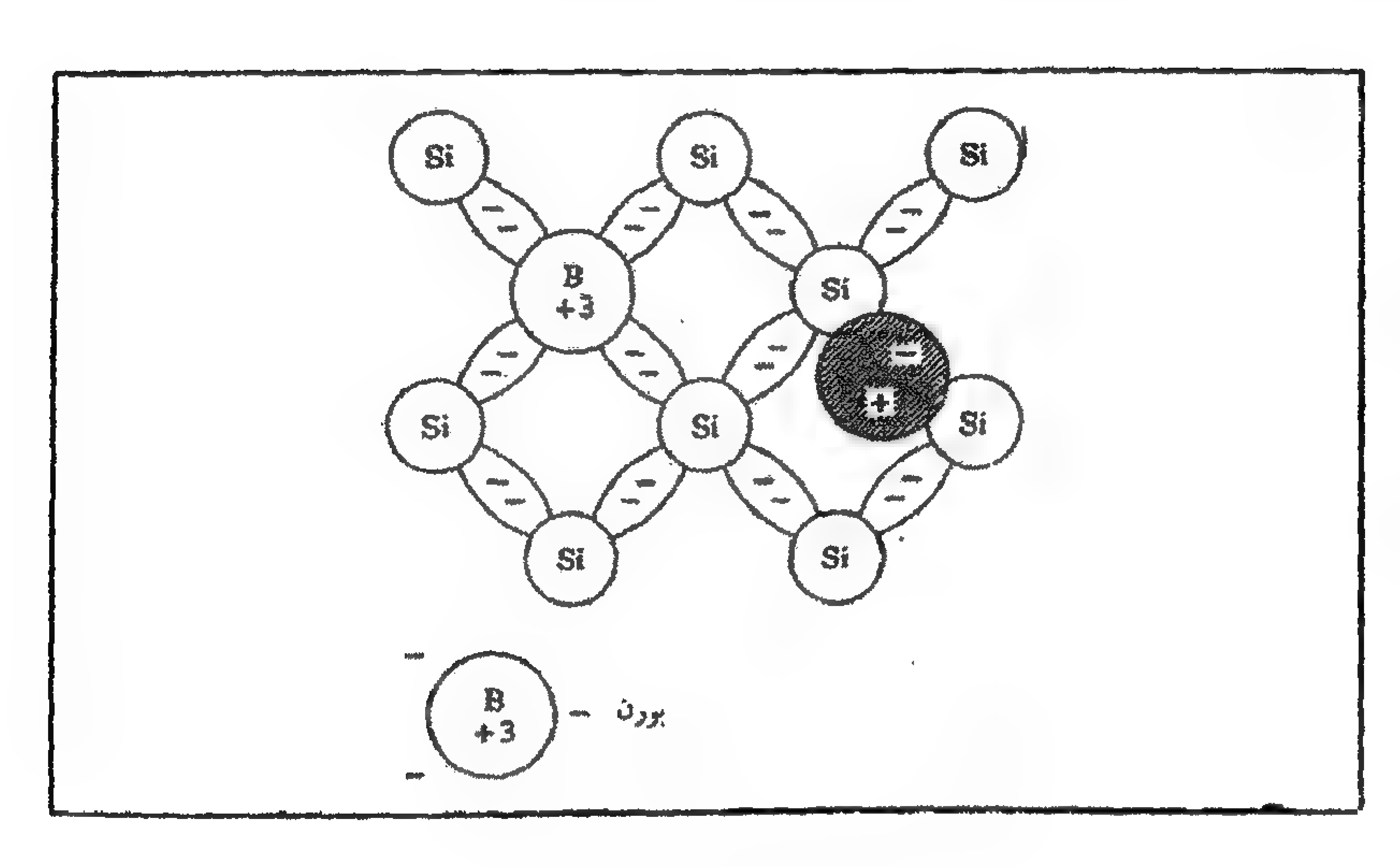
شرائط الطاقة لشبه موصل ذاتي (E_f) مستوى طاقة فيرمي، (E_c) الطرف السفي لشريط التوصيل ، (E_v) الطرف العلوي لشريط التكافؤ ، (E_g) فجوة الطاقة. عند درجة حرارة T=0 K، يبقى شبه الموصل عملياً عازلاً، وعلى درجة حرارة محددة، تتهيج بعض الإلكترونات حرارياً وتعطي موصلية للجامد.

5-5 أشباه الموصلات الشائبة أو الدخيلة

Impurity or Extrinsic Semiconductors

يمكن أن تكون أشباه الموصلات الشائبة على شكل النوع -p(p-type) أو النوع -n(n-type) ويحصل على شبه الموصل النوع (-p) عندما تملك الذرات الشائبة إلكترونات تكافؤ تقل عن ذرات السيلكون أو الجرمانيوم المكونة للبلورة الأصلية.أما شبه الموصل النوع (-n) فينتج من إضافة أو إحلال ذرات شائبة تملك إلكترونات تكافؤ تزيد عن ذرات السيلكون أو الجرمانيوم. وجدير بالذكر أن كل من السيلكون والجرمانيوم هما مواد ذات رابطة تساهمية وتركيبها البلوري يتبع تركيب الألماس. فعندما تدخل ذرة عنصر ثلاثي التكافؤ مثل البورن، الألمنيوم، الجاليوم، الأنديوم والثاليوم مكان ذرة السيلكون، يصبح التركيب ناقصاً محلياً

وتأخذ الذرة الشائبة إلكتروناً إضافياً من رابطة مجاورة في الشبيكة لتكمل سحابة التوزيع الرباعي الأوجه المميز للشبيكة. وينتج عن هذا التبادل ثقب (hole) موجب يقع جانب الذرة الشائبة، ويأخذ في التحرك خلال الشبيكة في شريط التكافؤ مسبباً بذلك موصلية كهربائية. وتسمى الذرة الشائبة "المستقبل" (acceptor)، وحيث أن التوصيل الكهربائي ينتج عن حركة الثقوب الموجبة في شريط التكافؤ، فإن هذا النوع من أشباه الموصلات يسمى النوع (p) الشكل (8- 5).

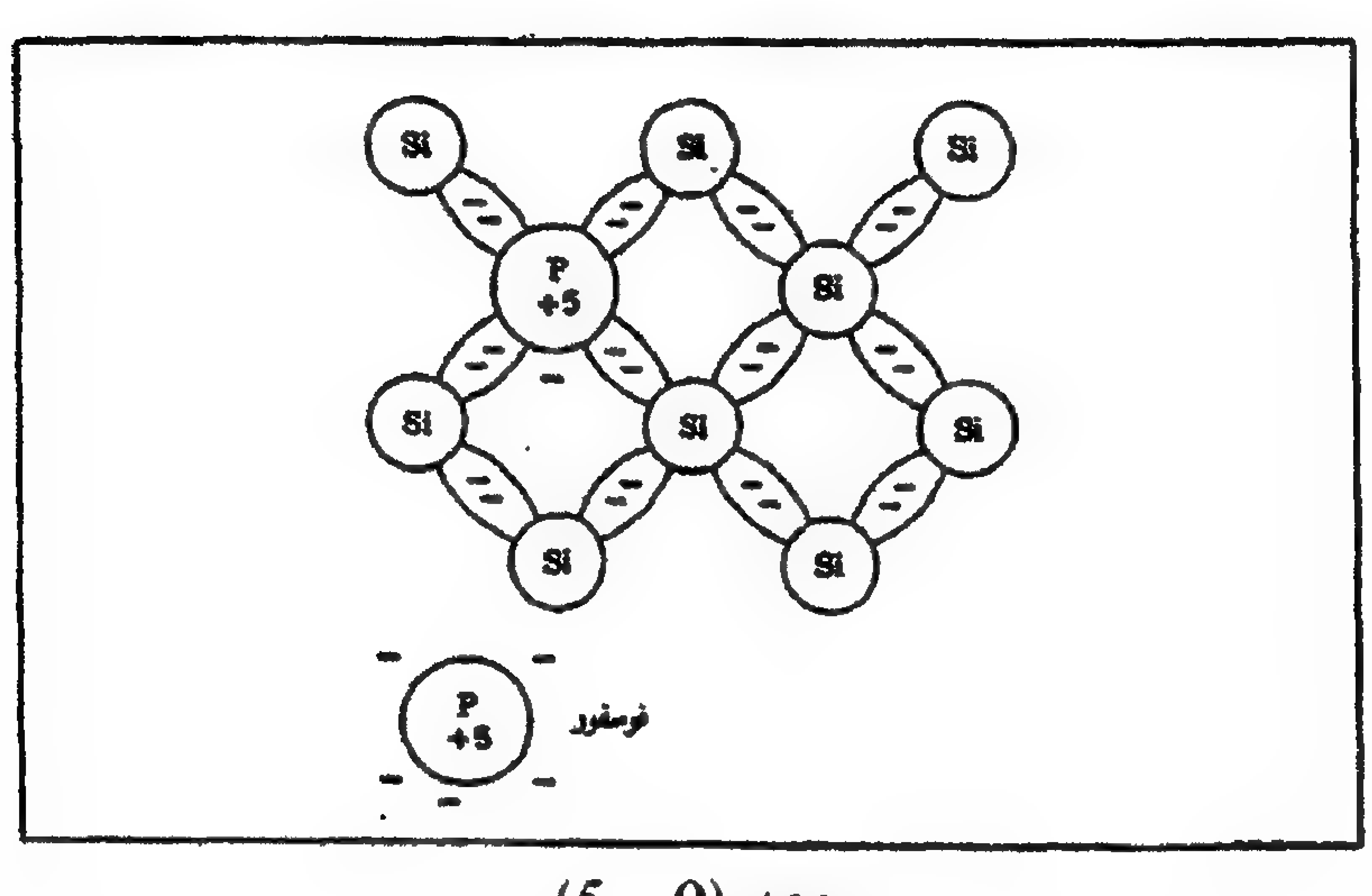


شكل (8- 5)

سيلكون النوع- p تظهر المساحة المظللة الثقب المتحرك الناتج عن حركة إلكترون ما من الرابطة (Si-Si) إلى ذرة بورن ليكمل مجموعة ثمانية (من الإلكترونات).

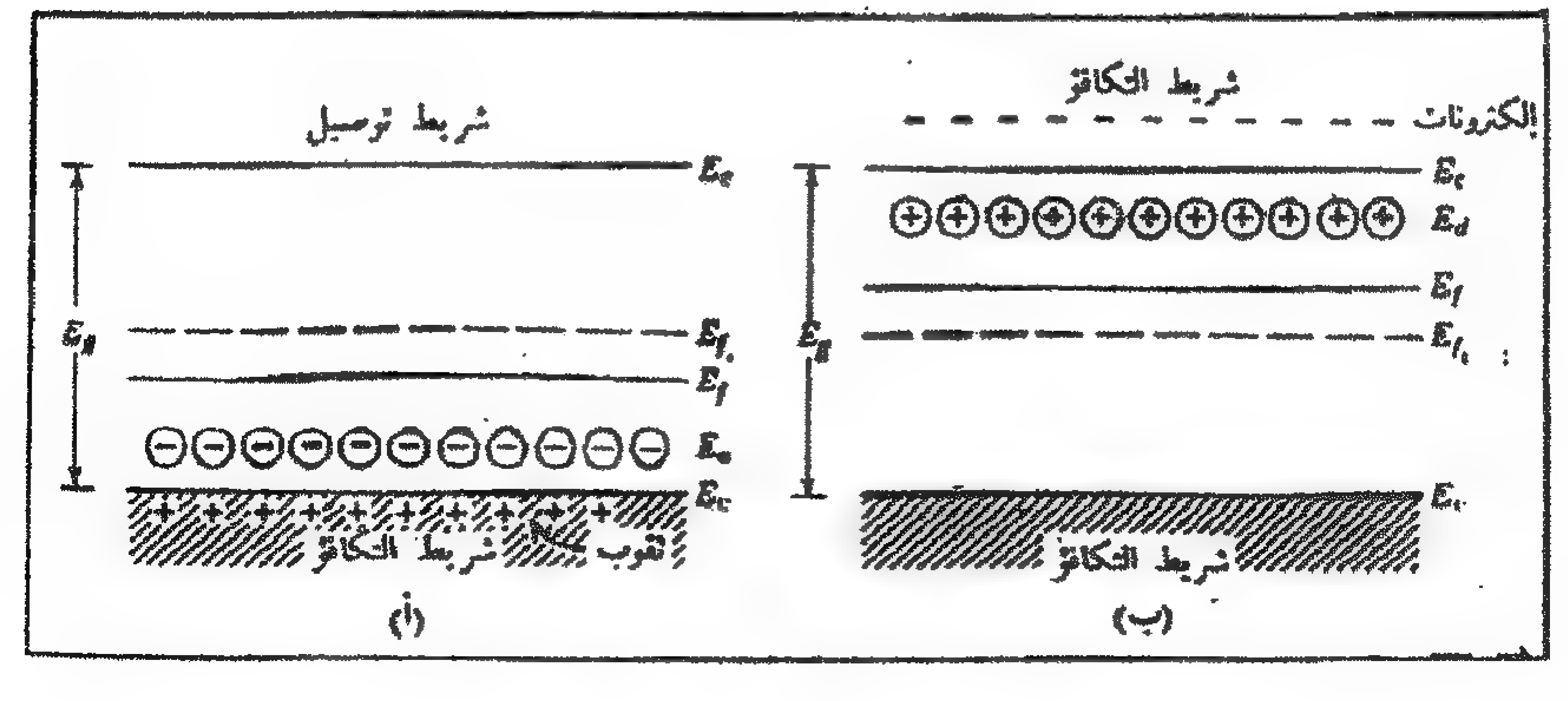
وإذا أخذنا بعض العناصر مثل الفسفور أو الأرسين، الأنتمون، والبرموت نجد أنها تملك خمس إلكترونات تكافؤ. فإذا حلت ذرة من هذه العناصر محل ذرة سيلكون فإن أربع فقط من إلكترونات التكافؤ تدخل في الروابط البين ذرية، ويجذب الإلكترون الخامس قليلاً بفعل الشحن الموجبة الزائدة للنواة. وإذا حصل تهيج حراري حتى على درجة حرارة الغرفة، فإن هذا الإلكترون ينتقل إلى شريط التوصيل. وهذا النوع من شبه الموصلات يسمى النوع (n) وتسمى الذرة الشائبة "الواهب" كما هو مبين في الشكل (9- 5) يبين الشكل (10- 5) رسماً توضيحياً لشريط الطاقة لشبه الموصل الشائب. وقد وجد ان إضافة ذرة شائبة داخل الشبيكة لعنصر السيلكون تعطي مستويات طاقة إضافية في التركيب الشريطي (band

(structure وتسمى هذه العملية المعالجة بالإضافة (doping) وتشغل ذرات العنصر المضاف (الخماسي التكافؤ) مستوى الطاقة الواهب (donor) ويقع بالقرب من الطرف السفلي لشريط التوصيل (E_d) أما الذرات الشائبة ذات التكافؤ الثلاثي، فإنها تخلق مستوى طاقة يسمى مستوى الطاقة "المستقبل" (acceptor) ويقع بالقرب ن الطرق العلوي لشريط التكافؤ. وفي العادة، يتم اختيار العناصر المضافة بحيث تعطي مستوى طاقة (سواء كان واهباً أو مستقبلاً) يقع بالقرب من شريط الطاقة المناظر.



شكل (9- 5)

سيلكون النوع (n-) يمكن تهيج إلكترون التكافؤ الخامس لذرة الفسفور لينتقل بسهولة إلى شريط التوصيل



شكل (10- 5)

شرائط الطاقة لأشباه الموصلات الشائبة على درجة حرارة محددة . (أ) شبه موصل النوع (p-) (ب) شبه موصل النوع (n-) . + و - تمثلان شحنات متحركة، ثقوب وإلكترونات، على التوالي $\oplus$ و $\ominus$ تمثلان الشحنات غير المتحركة الناتجة من تأين الذرات المستقبلة والواهبة، على التوالي (E_g) فجوة الطاقة (E_{fi}) مستوى فيرمي لشبه موصل ذات (E_d) و (E_a) هما مستويا طاقة لذرة واهبة وذرة مستقبلة على التوالي. عندما يستمر التأين، يتحرك مستوى فيرمي للطاقة نحو مستوى الطاقة للشوائب إلى أن يشغل على درجة حرارة محددة مستوى طاقة يقع بين المستوى (E_{fi}) ومستوى الطاقة الشائبة ، إما (E_a) أو (E_d).

وعند إضافة الذرات الواهبة والذرات المستقبلة لشبه الموصل الذاتي (intrinsic) تقع حالة اتزان يمكن توضيحها كالتالي:

عند درجة حرارة الصفر المطلق لا تتأين الشوائب سواء كانت ذرات مستقبلة أو واهبة . ولكن عند درجة حرارة معينة تكون بعض الذرات متعادلة كهربائياً والبعض الآخر متأيناً. فإذا رمزنا لعدد الذرات الشائبة (الواهبة) بالرمز : (N_d) ، لعدد الذرات الشائبة (المستقبلة) بالرمز : (Na) ، لعدد الذرات الشائبة (الواهبة) المتأينة بالرمز:) N_d^+ (، لعدد الذرات الشائبة (المستقبلة) المتأينة بالرمز :) N_a^- (، فإننا نستطيع أن نكتب:

$$N_d \rightarrow N_d^+ + n_e \quad \text{..................} \quad (5\text{-}3a)$$

$$N_a \rightarrow N_a^- + n_n \quad \text{..................} \quad (5\text{-}3b)$$

وعند وجود حالة من التعادل الكهربائي تتحقق العلاقة التالية:

$$n + N_a^- = n_n + N_d^+ \quad \text{..................} \quad (5\text{-}4)$$

إذا كانت $N_a = 0$، عندئذ يكون $N_d^+ + n_n = n_e$ ، ولكن إذا كانت N_d قيمة كبيرة بالنسبة إلى كثافة الحوامل الذاتية (intrinsic carrier density) وهذه حالة عادية فإننا نستطيع أن نكتب $N_d^+ = n_e$ وفي حالة اعتبار ذرات الشوائب المستقبلة يمكننا أن نكتب:

$$N_a^- = n_h$$

وبالمثل، فإننا نستطيع اشتقاق تعبير لتركيز حوامل الشحنة المتحركة (إما إلكترونات أو ثقوب) لشبه الموصل الشائب. لنفرض حالة من التأين الكامل حصلت للذرات الشائبة على درجة الغرفة، فإننا نستطيع أن نكتب: للشوائب الواهبة، $N_d = N_d^+ = n_e$ وللشوائب المستقبلة، $N_a = N_a^+ = n_h$.

إذن

$$n_e \approx N_d = N_c e^{-(E1-En)/KT} \quad \text{.............................} \quad (5\text{-}5)$$

حيث أن : E_{fn} = مستوى طاقة فيرمي الجديد في حالة شبة الموصل النوع - n.

N_c = الكثافة الفعالة لحالة الطاقة في شريط التوصيل.

وفي حالة شبه الموصل النوع - p ، فإننا نستطيع أن نكتب كما سبق أعلاه:

$$n_h \approx N_a = N_c e^{-(Eh-En)/KT} \quad \text{.............................} \quad (5\text{-}6)$$

وهنا يدل الرمز : E_{fh} على مستوى فيرمي لشبه الموصل النوع - p ، و N_0 الكثافة الفعالة لحالة الطاقة في شريط التكافؤ.

ويمكن تعيين الإزاحة الحاصلة لمستوى فيرمي عن قيمته الذاتية من المعادلات التالية:

لشبه الموصل النوع - n:

$$E_{fn} - E_{fi} = kT\ln\frac{n_e}{n_i} = kT\ln\frac{N_d}{n_i}$$

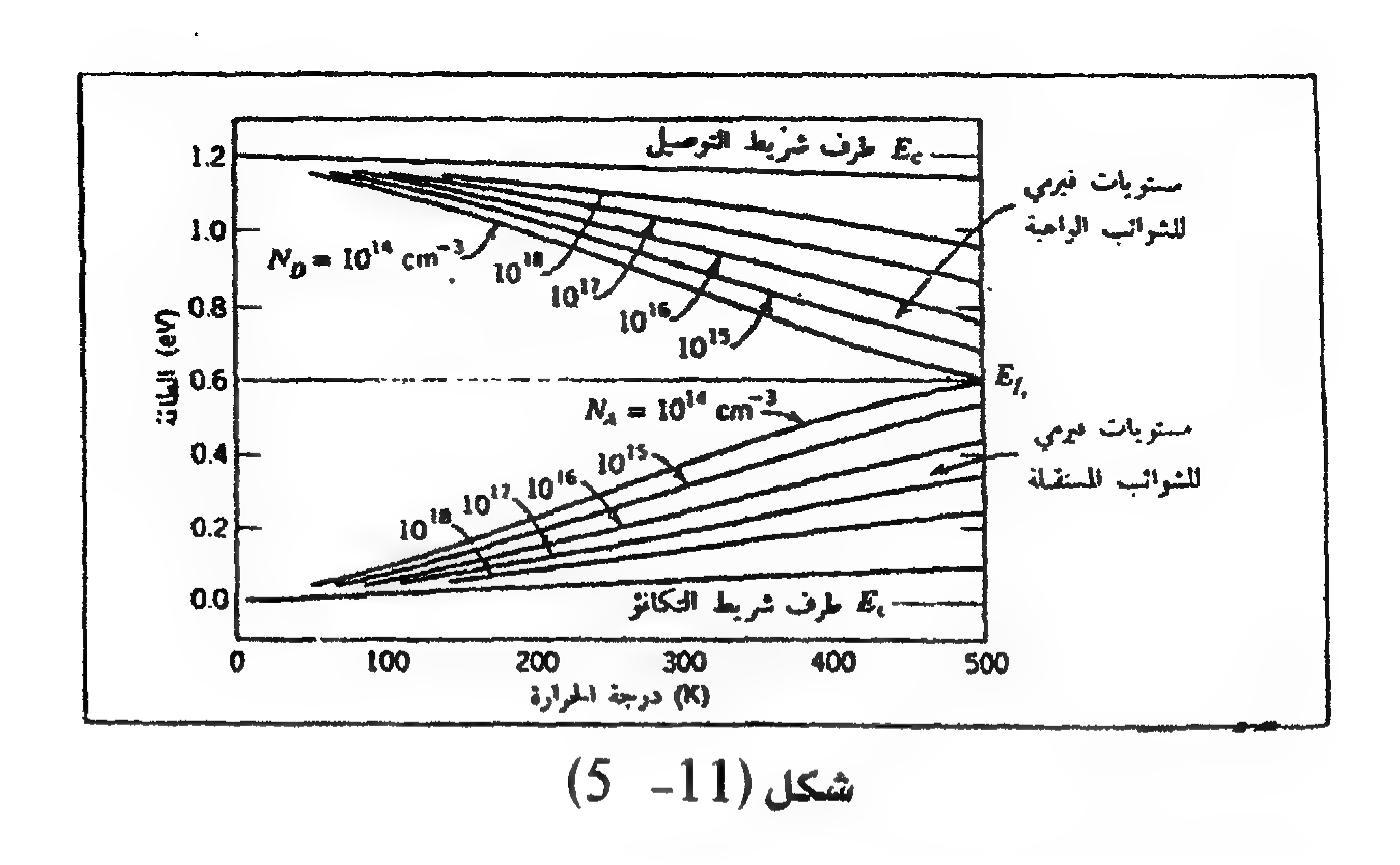
ولشبه الموصل النوع - p:

$$E_{fi} - E_{fn} = kT\ln\frac{n_h}{n_i} = kT\ln\frac{N_a}{n_i}$$

حيث أن: n_i تدل على عدد حوامل الشحنة الذاتية.

E_{fi} : مستوى طاقة فيرمي لشبه الموصل الذاتي وتبين المعادلتان (5-7a) و (5-7b) بوضوع أن مستوى فيرمي يزداد ويتحرك نحو مستويات الطاقة الواهبة (E_d) في حالة شبه الموصل النوع (n) وينقص ويتحرك نحو مستوى الطاقة المستقبل (E_a) في حالة شبه الموصل النوع (n) وينقص ويتحرك نحو مستوى الطاقة المستقبل (E_a) في حالة شبه الموصل نوع (p). ويمكن حساب مستويات الطاقة لأشباه الموصلات الواهبة والمستقبلة بنفس الطريقة المتبعة في حساب طاقات التأين للشوائب الموجودة في البلورة. ويتم ذلك باستخدام العلاقة الموضوعة لتأين ذرات الهيدروجين ولكن نستبدل هنا كتلة الإلكترون بكتلة الإلكترون الفعالة أو كتلة الثقب الفعالة في الشريط المناظر (شريط التوصيل أو شريط التكافؤ)، ونستبدل ثابت الوسط للوسط الحر بثابت العزل للبلورة. إذن نستطيع أن نكتب:

$$E_c - E_d = \frac{m_e^* e^4}{8\varepsilon^2 h^2} = \frac{13.6 m_e^*}{\varepsilon^2 m_e} eV$$



شكل (11- 5)

5-6 المواد العازلة (Insulating Mateials):

من أجل أن تتمكن المواد العازلة للكهرباء أن تكون حسنة الأداء، يجب أن تملك ثابت عازل منخفض وعامل قدرة (power factor) صغير ومقاومة عزل عالية وشدة عازل كبيرة. فمثلاً، تتطلب العوازل المستعملة في المكثفات ثابت عازل عال، حيث يعمل ذلك على خزن كمية كبيرة من الطاقة في الوسط العازل الرقيق نسبياً وعلاوة على ذلك، يجب أن تملك المواد العازلة استقراراً كيميائياً كافياً، مقاومة عالية للرطوبة، مقاومة للحرارة والتسخين وخواص ميكانيكية تصلح لظروف الاستعمالات المعينة.

شدة العازل (Dielectric Strength):

تعتبر شدة العازل أحد المتطلبات الهامة جداً للحصول على عزل كهربائي جيد. ويقصد بشدة العازل المتانة الكهربائية له، أو بتعبير آخر هي شدة المجال الكهربائي النهائي (الحدي) الذي ينهار فوقها العازل تماماً. والوحدة العاملة والمستعملة للتعبير عن شدة العازل هي فولت لكل مليمتر من سمك المادة العازلة وعلى طول الزمن الذي يستغرقه تطبيق الفلطية الكهربائية. وأية زيادة في السمك تزيد من قيمة الفلطية للانهيار، ولكن الزيادة ليست طردية لأن شدة العزل للمادة تتغير عكسياً مع الأس (0.4) للسمك. ويعزى هذا التغير لوجود شقوق وثقوب

صغيرة في المادة، والتي ربما تؤدي إلى تيار تسرب محلي ينتج عنه انهيار سابق لأوانه. ولهذا السبب، يجب فحص العزل الكهربائي عند السمك المستخدم تقريباً في الأجهزة الكهربائية. وعمل عادة بعض العوامل مثل الرطوبة، التلوث ، درجة الحرارة العالية،التعتيق ، والإجهاد الميكانيكي على تخفيض شدة العازل للمادة. وهناك خصائص هامة أخرى هي : مقاومة العزل وفواقد العزل. فمقاومة العزل هي التأثير المشترك للمقاومة السطحية والحجمية، والمقاومة ربما تختلف كثيراً في القيمة بسبب عدم تجانس المادة والظروف البيئية. فعلى سبيل المثال، تتأثر المقاومة السطحية بصورة كبيرة بفعل رطوبة الهواء التي ربما تؤدي إلى تكوين غشاء رقيق على السطح.

فواقد العازل (Dielectric Losses):

يعمل كل من الاحتكاك الداخلي للمادة والتهيج الحراري على مقاومة أو إعاقة توجيه ثنائيات القطب والدوران الناتج. والطاقة اللازمة لإبقاء هذا الدوران تعلل فقدان القدرة (Power loss) وتعتمد هذه الفواقد على تردد المجال الكهربائي المؤثر، ولكن ربما تكون هذه الفواقد أصغر عند التردد العالي جداً لأن المجال ينعكس بسرعة فائقة يستحيل عندها اصطفاف الثنائيات تماماً مع المجال.

وربما تنتج فواقد العزل للمادة العازلة عن الامتصاص للطاقة الكهربائية (احتكاك داخلي لثنائي القطب) وعن تيارات التسرب خلال المادة. ويقع التسرب عن طريق التوصيل الكهربائي الذي يظهر عامة أيونياً بطبيعته ويهمل في العادة ما عدا على درجات الحرارة العالية. وتؤدي فواقد الامتصاص تحت تأثير المجال الكهربائي المتناوب إلى تبديد الطاقة الكهربائية كحرارة تسخن المادة. والعازل المثالي لا يمتص طاقة كهربائية، وتستعاد شحنة المكثف بالكامل عند إزالة المجال الكهربائي. وعلى كل حال، تسبب المادة العازلة الحقيقية دائماً بعض ضياع الطاقة الكهربائية، إلا أنها تكون في عدة حالات صغيرة جداً، ويقاس هذا الضياع عن طريق فرق الطور بين زاوية الطور والزاوية (90°) للمكثف المثالي. ويعرف عامل الفقد بحاصل ضرب

عامل التبديد الحقيقي وثابت العازل، وهو مقياس لفقدان القدرة (القدرة الضائعة) في العزل. ويشكل عامل التبديد الجزء المفقود من الطاقة أثناء الدورة الواحدة.

ويتأثر عامل الفقد بتردد المجال الكهربائي. فعند الترددات المنخفضة تملك ثنائيات القطب الوقت الكافي لتوجه نفسها بالكامل بموازاة الاتجاه اللحظي للمجال الكهربائي. ويقع هذا التوجيه أولاً في اتجاه واحد وثم في الاتجاه الآخر، حيث يتبع التغيرات في اتجاه المجال. ويقابل دوران ثنائي القطب الناتج بمقاومة من قبل الاحتكاك الداخلي للمادة ومن التهيج الحراري للجزئيات. فالطاقة اللازمة لحفظ هذا الدوران تعلل مصدر فقدان القدرة. وعندما تزداد الترددات يصبح الدوران أكثر سرعة وتزيد الطاقة المفقودة (فقد الطاقة). وإذا وصلت الترددات إلى قيمة عالية جداً، فإن المجال الكهربائي ينعكس دورياً بسرعة كبيرة يتعذر عندها اصطفاف الثنائيات كاملاً مع المجال، ونتيجة لذلك تقل ذبذبات ثنائي القطب وتقل قيمة ثابت العازل، بينما تزداد فواقد القدرة وتأخذ قيمة قصوى قبل أن تصبح ضئيلة أو مهملة عند الترددات الأعلى بمقدار كبير.

مزايا المواد العازلة (Characteristics of Insulating Materials):

يمكن أن تكون المواد العازلة غازات، سوائل، وجوامد، لكن السوائل والجوامد لها فقط أهمية تجارية، وتجتمع خصائص العزل للغازات مع قدرتها على التبريد، ويستفاد منها في تأمين العزل في المحولات الكهربائية الكبيرة، والمولدات، ومفاتيح وقواطع الدوائر الكهربائية، وهناك غازات عازلة جديدة تستخدم عند درجات الحرارة والفلطية الكهربائية العالية. وتملك هذه الغازات شدة عازل أكبر ومقدرة ممتازة للتبريد تفوق مقدرة الهواء أو النيتروجين وتوجد تحت متناول اليد. وهذه الغازات هي سداسي فلوريد الكبريت (SF_6) والهيدروكربونات الهالوجينية مثل (CF_4,$CCIF_3$, CCl_3F,CCl_4).

وللسوائل العازلة نفس خصائص العزل المذكورة أعلاه للغازات، وهي في الأساس مركبات غير قطبية مثل زيوت النفط. أما زيوت السيليكون،

الهيدروكربونات الفلورونية والمواد الكيميائية الفلورية الأخرى، فتستخدم أيضاً لأغراض العزل تحت درجات الحرارة الأعلى حيث تتميز بمقاومة عالية للتأكسد. وتستخدم السوائل العازلة بصورة رئيسية كمشريات لكابلات القلطية الكهربائية العالية والمكثفات، وكأوساط حشوة للمحولات وقواطع وأقطاب الدوائر الكهربائية.

وتشمل المواد العازلة الجامدة المبلمرات والخزفيات. وتشمل المبلمرات أنواعاً متعددة من المواد البلاستيكية، المطاط، الشمع، الورق، والخيوط والأنسجة الصناعة، ويمكن استخدامها على أشكال مختلفة كالأغشية، الصفائح، الألواح، الأنابيب الجامدة والطرية، القضبان، الأشرطة والقوالب المصبوبة.

ويمكن أن تحتوي تراكيب القوالب على حشوات مختلفة مثل المايكا الطبيعية أو الصناعية على شكل مسحوق، التيتانات، الكوارتز، الخيوط الزجاجية، الأسبست، الألومنيا ومواد أخرى مشابهة. والمواد البلاستيكية، مثل البوليثيلين والبوليتر فلورثلين والبوليسترين، لا تملك عزوم ثنائية القطب دائمة في تركيبها ولها ثوابت عازلة منخفضة تقع بين (2.6- 2.2) وليس لها فقدان عزل تجريبي. وينتج الاستقطاب بصورة رئيسية في هذه المبلمرات بواسطة ميكانيكية ذرية والكترونية. أما المبلمرات التي تحتوي على ثنائيات قطب دائمة، مثل البوليفينيل كلوريد والبوليمثيل مثكريليت والرزن الفينولي ومركبات أخرى مماثلة، فإنها تظهر ثوابت عازلة أعلى (4.0- 3.2)، وفواقد عزل أكبر عند تطبيق التيار المتناوب.

وتعطي الخزفيات عزلاً ممتازاً، لأنها تملك شدة عازل عالية واستقرار حراري ممتاز، والخزفيات الشائعة الاستعمال كمواد عازلة هي الزجاج، البورسلين، الألومنيا، الكوارتز، المايكا، والأسبست، وجميعها لها ثوابت عازلة تصل إلى (12). وهناك مجموعة أخرى من الخزفيات تملك ثابت عازل أكبر من (12) مثل معدن الروتيل (TiO_2) ومجموعة من المواد تظهر خاصية الكهربائية الإجهادية وخاصية الفيروكهربائية حيث تملك قيماً عالية لثابت العزل.

وتصنع المواد العازلة المركبة من مشطورات المايكا التي توضع بينها رقائق من الورق أو النسيج، وتلصق معاً بمادة مشربة مثل الورنيشات المعضوية، الراتنج أو الرزن، والورنيشات السيلكونية.

الوحدة السادسة

الخواص المغناطيسية

Magnetic Properties

الخواص المغناطيسية

Magnetic Properties

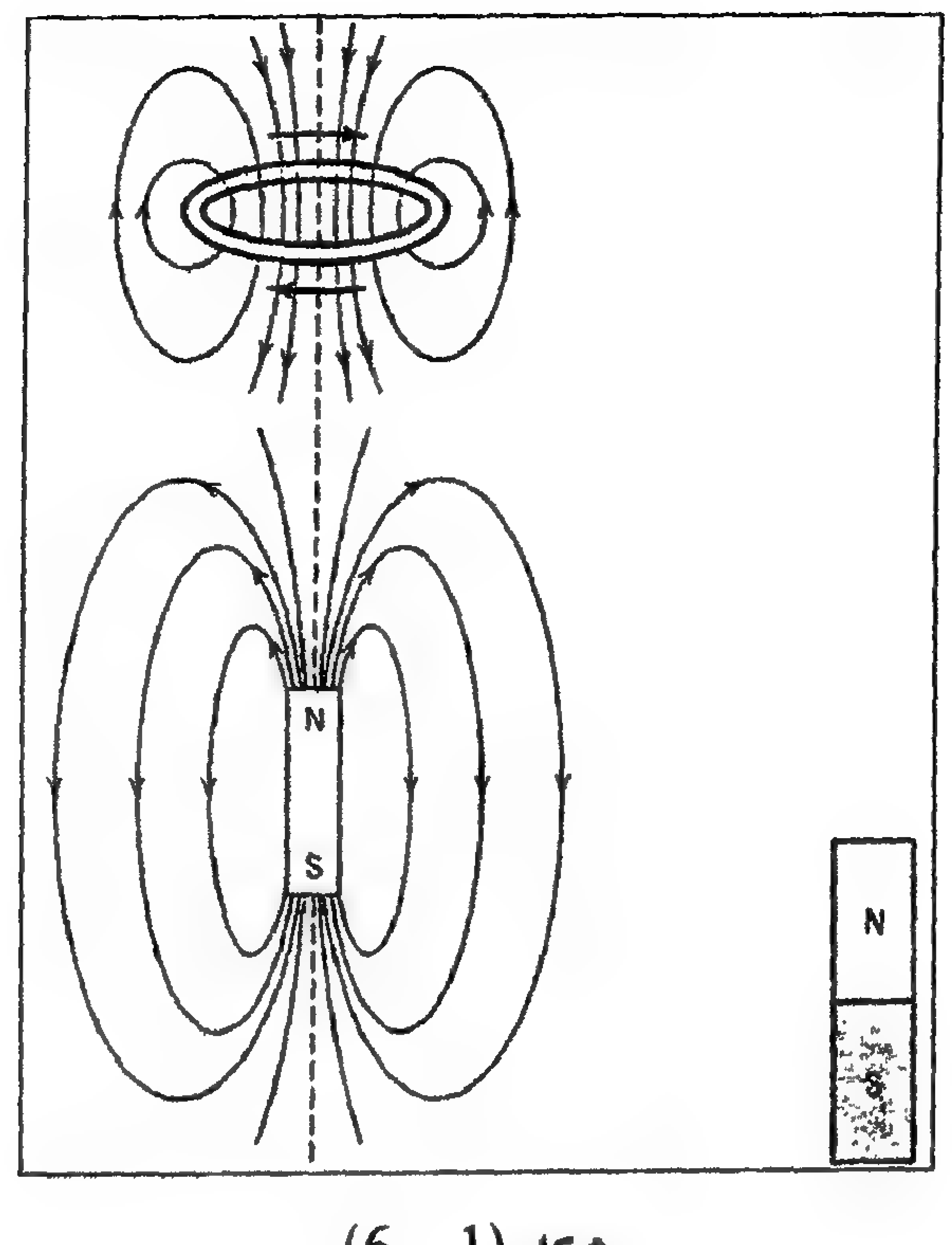
1. مقدمة:

المغناطيسية هي الظاهرة التي تتمكن بواسطتها المواد من امتلاك قوة جذب أو تنافر أو التأثير على المواد الأخرى. وقد عرفت هذه الظاهرة منذ آلاف السنين. ولكن القوانين والآليات التي تفسر الظاهرة المغناطيسية معقدة. وقد راوغ فهمها الباحثين والعلماء حتى وقت قصير. تعتمد العديد من الأجهزة التكنولوجية الحديثة على المغناطيسية والمواد المغناطيسية وهذا يتضمن مولدات الطاقة الكهربائية، والمحولات الكهربائية والمحركات الكهربائية، الراديو، والتلفزيون، الحاسوب،والقطع الخاصة بأنظمة إعادة إنتاج الصوت والصورة.

الحديد السكب وبعض أنواع الفولاذ وبعض الحجارة المعدنية أمثلة معروفة على المواد التي تظهر مزايا مغناطيسية ولكن من غير المألوف أن جميع المواد تتأثر بدرجة أو بأخرى بوجود المجالات المغناطيسية.

تتولد القوى المغناطيسية عن طريق جسيمات متحركة مشحونة كهربائياً. هذا بالإضافة إلى العديد من القوى الكهربائية الساكنة التي قد تكون موجودة. ومن الملائم غالباً النظر إلى القوى المغناطيسية على أنها مجالات مغناطيسية. ويمكن رسم خطوط قوى وهمية لتبين اتجاه هذه القوى ضمن منطقة التأثير المغناطيسي. وهي مبينة في الشكل (1- 6) لتيار يمر في حلقة دائرية ولمغناطيس مستقيم.

وقد وجد أن ثنائية القطب المغناطيسي موجودة في المواد المغناطيسية (قطب شمالي وقطب جنوبي). ويقابل ذلك في الكهرباء الشحنات الموجبة والشحنات السالبة.



شكل (1- 6)

المجال المغناطيسي حول مغناطيسي دائري وقضيب مستقيم

6-2 مفاهيم اساسيةBasic Concepts:

تنشأ الخواص المغناطيسية للمواد من لف (spin) الالكترونات والحركة المدارية لها حول نويات الذرات. وبما أن الشحنة المتحركة تنصب حولها مجالاً مغناطيسياً، فإن الالكترونات المستمرة في الحركة واللف تعمل كمغناطيسيات صغيرة للغاية. وفي كثير من الذرات تعادل السبنات (spins) المتضادة بعضها بعضاً، ولكن حينما توجد زيادة من الالكترونات التي تلف في اتجاه واحد، عندئذ ينشأ مجال مغناطيسي. وجميع المواد قادرة على إظهار تأثيرات مغناطيسية خارجية، باستثناء المواد الفيرومغناطيسية القادرة على تكوين مغناطيسيات دائمة.

ويوصف المجال الخارجي بقوة المجال المغناطيسيH والحث المغناطيسي B. ويعرف مقدار الحث المغناطيسي بعدد خطوط الحث الفرضي لوحدة المساحة العمودية على اتجاه حثها، وتقاس بوحدات تسلا، tesla (T). ويشير الحث المغناطيسي أيضاً إلى كثافة الفيض لأن الحث على نقطة ما يساوي الفيض لوحدة المساحة.

وتسمى قوة المجال المغناطيسي أيضاً الشدة المغناطيسية أو القوة المغنطة، ويمكن تمثيلها أيضاً بخطوط التمغنط مثل الحث المغناطيسيHبوحدة لكل متر.

ويعرف التمغنط (magnetization)، أو العزم المغناطيسي لوحدة الحجم بحاصل ضرب العزم المغناطيسي لكل ذرة في عددها الموجود في وحدة الحجم. وتسمى النسبة بين التمغنط (المغنطة) وبين المجال المغناطيسي المؤثر بالتأثيري المغناطيسية (Susceptitlity):

$$X_m = \frac{M}{H} \quad \text{.......(6-1)}$$

ويرتبط التمغنط M ، والمجال المغناطيسي H ، والحث B بالمعادلة التالية:

$$B= H + 4\,\pi M \quad \text{.......(6-2)}$$

وترتبط النفاذية μ والتأثيرية X_m بمعادلة مناظرة:

$$\mu = 1 + \pi Xm \quad \text{.......(6-3)}$$

ومن المعادلات 1- 6 ، 2- 6 ، 3- 6 نحصل على معادلة تربط H,B و X_m:

$$B + H + 4\,\pi\, Xm\, H = H\,(1 + 4\pi Xm) \quad \text{.......(6-4)}$$

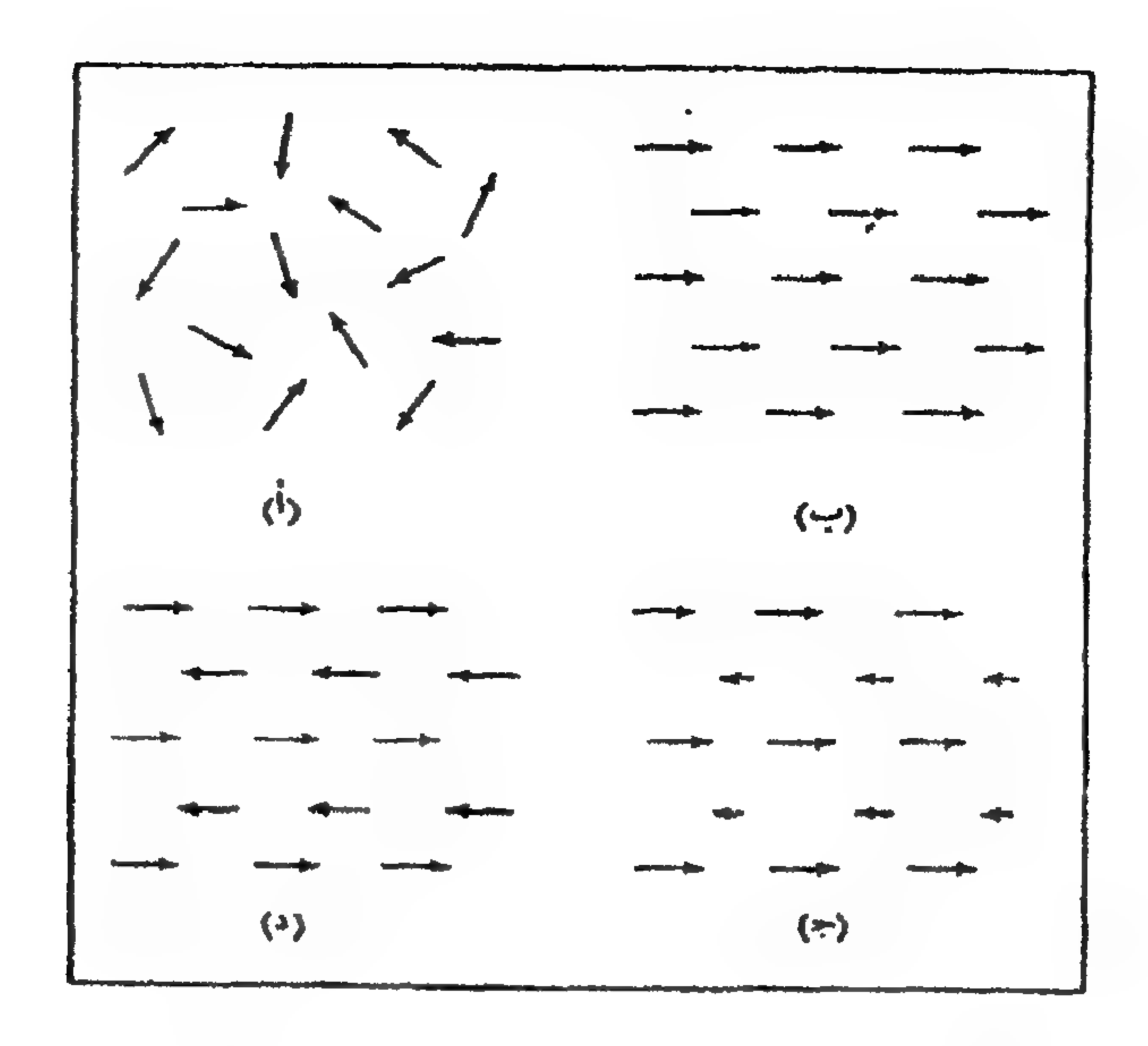
وبتعويض المعادلة 3- 6 في المعادلة 3- 12 نحصل على:

$$B=\mu H \qquad \mu=\frac{B}{H} \quad ....(6\text{-}5)$$

والنفاذية هي مقدرة المادة على التمغنط أو السهولة التي يمكن بها للقوة المغنطة H أن تنتج كثافة فيض B في الدائرة المغناطيسية. والنفاذية تساوي عددياً للمقدار B/H ، ولكن العلاقة بين B و H معقدة للغاية. لهذا لا يمكن تعيين النسبة B/H تحليلياً، لكنها تمثل بمنحنى تجريبي.

وفي الفراغ الحر يمكن كتابة $B = \mu_0 H$ حيث أن μ_0 النفاذية في وسط الفراغ وتساوي $4\pi \times 10^{-7}$ H/m في المواد الجامدة $\mu \neq \mu_0$ ، والنفاذية النسبية $\mu\pi$ $= \mu/\mu_0$. أما بالنسبة للمواد الديامغناطيسية والبارامغناطيسية فإن $\mu \cong 1$.

وإذا أخذنا في اعتبار سلوك المواد على المجال المغناطيسي المؤثر، فإننا نستطيع تقسيمها إلى ثلاث فئات مميزة هي: المواد الديامغناطيسية، البارامغناطيسية، والفيرومغناطيسية (الشكل 2- 6أ). وعلاوة على ذلك، تعتبر المواد الفيرومغناطيسية المضادة والفيرومغناطيسية أنواعاً فرعية للمواد الفيرومغناطيسية. وتتركب المواد الديامغناطيسية من ذرات لا تملك عزوم مغناطيسية دائمة، بل لها عزوم مستحثة ضعيفة فقط. والجوامد الأيونية والجزيئية هي بوجه عام ديامغناطيسية. وتنشأ المواد البارامغنلاطيسية لأن ذراتها تملك عدداً فردياً من الالكترونات التي تعمل على إعطاء عزم مغناطيسي دائم متخلف، ويمكن أن تكون الذرات التي تملك عدداً زوجياً من الالكترونات بارامغناطيسية إذا كان بعض مداراتها غير مكتملة. وتأخذ المواد الديامغناطيسية وضعاً عمودياً على اتجاه المجال المؤثر، بينما تصف المواد البارامغناطيسية نفسها موازية لاتجاه المجال.



الشكل (2- 6) يبين الشكل أربعة أنواع من المغناطيسية مع التفاعلات الذرية البنية المختلفة . (أ) البارامغناطيسية (ب) الفيرومغناطيسية (جـ) الفيرومغناطيسية المضادة (د) الفريمغناطيسية.

تظهر المواد الفيرومغناطيسية عزماً تلقائياً يمكن أن يوجد حتى في غياب المجال المغناطيسي المؤثر. وتظهر بعض العناصر والمركبات خواص فيرومغناطيسية مثل الحديد، النيكل، والكوبلت، وكذلك أكاسيدها والكربيدات، ويظهر العنصر الأرضي – النادر، جادولينيوم، خواص فيرومغناطيسية على درجات حرارة أدنى. وتنشأ الفيرومغناطيسية فقط عندما تكون التفاعلات يبن الذرات أو الأيونات المتجاورة في البلورة قوية إلى درجة تكفي لمسك العزوم المغناطيسية للذرات المتجاورة موازية لبعضها بعضاً رغم تهيج الحراري (الشكل 2- 6ب). وتوجد الفيرومغناطيسية لوحدها في العناصر التي تملك مستوى طاقة غير مكتمل مثل المستوى 3d في الحديد، الكوبلت، والنيكل، ومستوى الطاقة 4f في الحادولينيوم. وعلى كل حال، لا يشترط أن تكون جميع العناصر الحاوية على مستويات طاقة غير مكتملة مواد فيرومغناطيسية.

وتنشأ الفيرومغناطيسية المضادة عن وجود ترتيبة قفل locking متضاد للسبنات، حيث تؤدي إلى تفاعل سالب بين أقرب الذرات المتجاورة (2- 6جـ). وعندما تكون العزوم المغناطيسية غير متساوية، فإن الترتيب المتضاد في الاتجاه يؤدي إلى خاصية الفيرومغناطيسية.

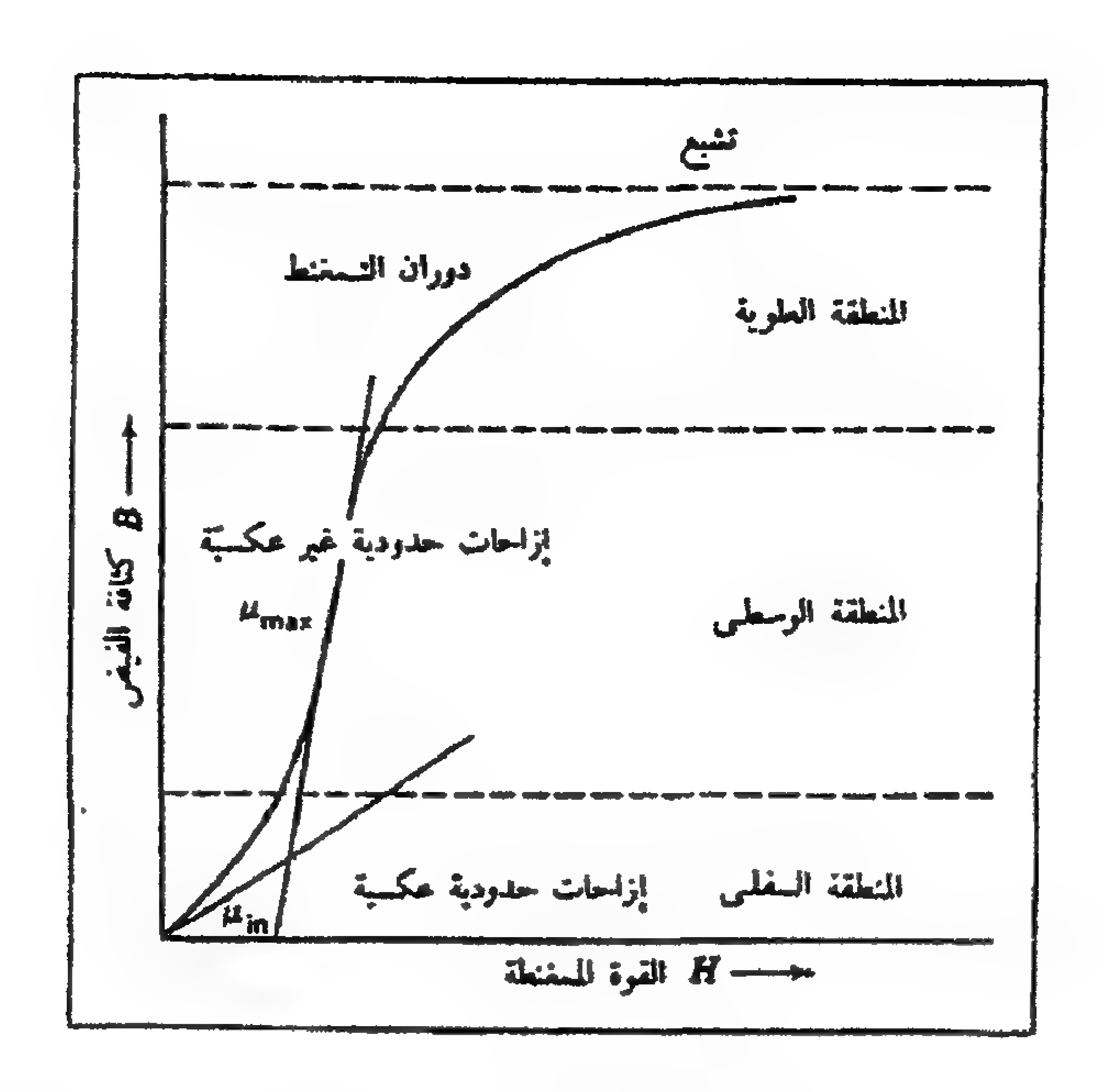
6-3 منحنى التمغنط والتخلف المغناطيسي

Magnatic Curve and Hysteresis:

تتصف العلاقة بين المجال المغناطيسي H والحث المغناطيسي B بالتعقيد. ويمثل الشكل (3- 6) التغيرات في الحث المغناطيسي عند تغيير قيمة المجال المغناطيسي.

ويمكن تمييز ثلاثة مناطق مميزة في المنحنى. الجزء الابتدائي وله ميل محدد يسمى النفاذية الابتدائية. الجزء الأوسط وله الميل الأقصى حيث تأخذ النفاذية قيمتها القصوى.

أما الجزء الأعلى والذي ينحني إلى الأعلى حتى يقترب من الخط الأفقي فهو يمثل حالة التشبع المغناطيسي، ومن الجدير بالذكر أن أية زيادة في المجال المغناطيسي فوق هذا الحد لا تسبب أية زيادة في الحث المغناطيسي الذي يكون قد وصل إلى حالة التشبع.

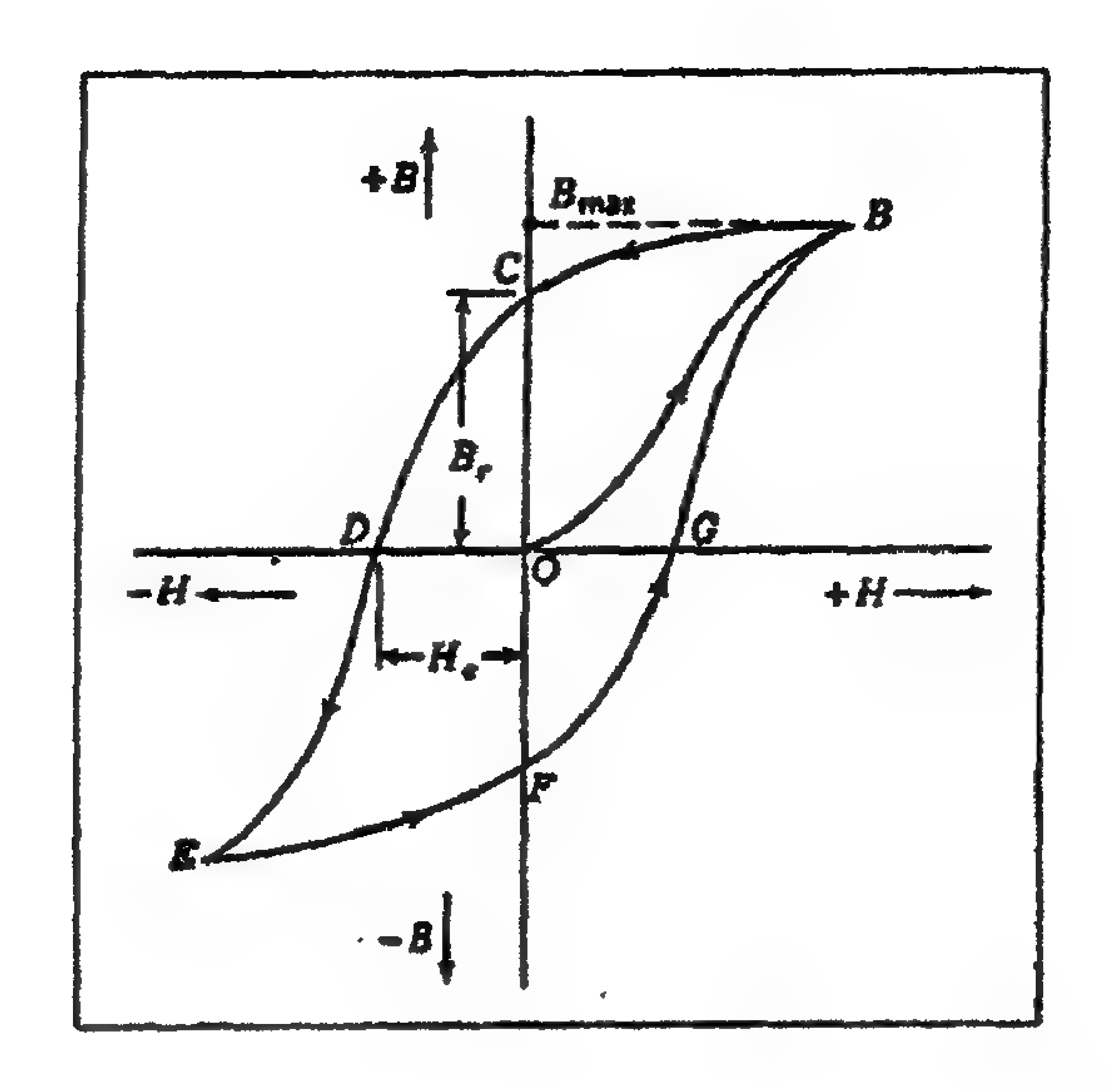


الشكل (3- 6) منحنى التمغنط (الحث المغناطيسي أو كثافة الفيض B بدلالة المجال المغناطيسي أو قوة التمغنط μ_{in} .(H) النفاذية القصوى، وتعرف بالقيمة القصوى لميل منحنى التمغنط.

التخلف المغناطيسي Hysteresis:

نستطيع تعريف التخلف المغناطيسي بالتخلف الواقع في تغيرات التمغنط خلف تغيرات المجال المغناطيسي. فإذا تعرضت مادة فيرومغناطيسية لمجالات مغناطيسية تزيد وتنقص، ورسمت التغيرات في الحث المغناطيسي بدلالة المجال المغناطيسي، نتج عن ذلك المنحنى الأنشوطي (الكامل الدارة) للتخلف المغناطيسي، أو باختصار منحنى التخلف المغناطيسي المبين في الشكل (4- 6).

فعند زيادة المجال المغناطيسي H ، يزيد أيضاً الحث المغناطيسي B، ويتبع منحنى التمغنط الخط OB وعند تنقيص المجال H ، فإن التمغنط على الخط الأصلي OB، ولكنه يتبع الخط BC.



الشكل (4- 6): منحنى التخلف المغناطيسي لمادة فيرومغناطيسية. الخط OB يمثل منحنى التمغنط، OC كثافة الفيض المتبقية ويساوي الحث المغناطيسي المتخلف (B_r)، OD القوة الظاهرة (H_c)اللازمة لجلب كثافة الفيض المغناطيسية للصفر، B_{max} الحث المغناطيسي الأقصى ويساوي تمغنط التشبع $B_r = 4\pi M_s$

وعند النقطة C ، حيث يكون المجال المغناطيسي صفراً- فإن الحث المغناطيسي لا يصبح صفراً ولكنه يأخذ القيمة B_r، التي تعرف بالحث المتبقي أو المتخلف. فإذا أثر المجال المغناطيسي في الاتجاه السالب (أي عكس اتجاهه مع زيادته)، نصل إلى النقطة D حيث يصبح الحث المغناطيسي صفراً، ويأخذ القيمة H_c. وتسبب هذه القيمة السالبة للمجال المغناطيسي إزالة التمغنط، وتسمى بالقوة القاهرة (coercive force). فإذا استمرت الزيادة في المجال المغناطيسي في الاتجاه السالب فإنها تؤدي إلى حث أقصى ولكن في الاتجاه المضاد (النقطة E). وإذا أكملنا النقصان والزيادة في المجال المغناطيسي بنفس الطريقة السابقة، حصلنا على المنحنى EFGB، وتكون الدارة قد أكملت. وتسمى المساحة المغلقة بالمنحنى الأنشوطي للتخلف المغناطيسي وتمثل الطاقة المفقودة أثناء تلك الدورة الكاملة.

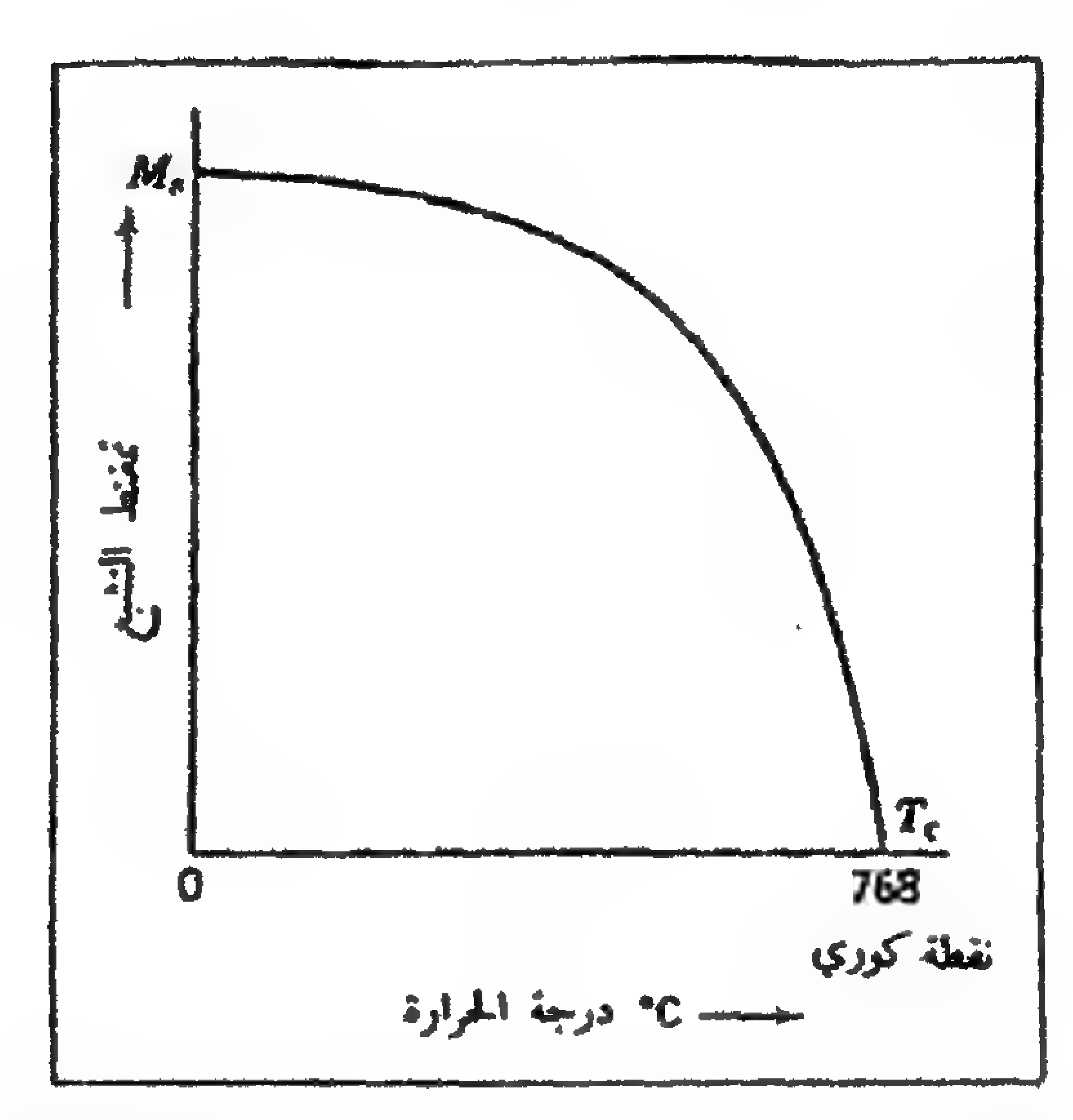
وعندما يتغير المجال المغناطيسي المؤثر دورياً على سرعة محددة، تصبح تأثيرات التيار الدوامي هامة. ويعتمد مقدار هذه التيارات الدوامية على كل من التردد وكثافة الفيض المؤثرة بفعل تطبيق المجال المغناطيسي، وعلى المقاومة النوعية وسمك قلب المادة. وينحصر تأثير التيارات الدوامية في زيادة المجال المغناطيسي H، عند الحث، مما يؤدي إلى منحنى تخلفي مغناطيسي أكثر عرضاً. ويعرف المجموع لفقدان التخلفي المغناطيسي وفقدان التيار الدوامي بفقدان القلب الكلي (core loss)، ويعبر عنه عادة بوحدة الواط كل باوند لسمك محدود وعند حث مغناطيسي معين.

6-4 درجة حرارة كوري المغناطيسية Curie Temperature:

تكاد تكون جميع المواد الفيرومغناطيسية، عند درجات الحرارة المنخفضة جداً، مشبعة التمغنط تماماً .ولكن عندما تزداد درجة الحرارة ينقص تمغنط التشبع ببطء، ثم يتسارع في النقصان حتى يصبح صفراً عند درجة حرارة ما. عندئذ تصبح المادة لا مغناطيسية من الناحية التجريبية (الشكل 5- 6). وتعرف هذه الدرجة الذي تأخذ قيمة مميزة لكل مادة مغناطيسية بدرجة حرارة كوري. ويمكن تعريفها من ناحية أخرى، بدرجة الحرارة التي فوقها يتخفى العزم الذاتي للمادة الفيرومغناطيسية في غياب المجال المغناطيسي الخارجي. فعلى سبيل المثال، درجة حرارة كوري للحديد 768°C وللكوبالت 1120°C.

وباستعمال التقنية المتالورجية أصبح من الممكن إنتاج مادة مغناطيسية تملك درجة حرارة كوري حسب المطلوب، وذلك بواسطة عملية تأشيب مناسبة للعناصر الفيرومغناطيسية، أو بإضافة عنصر لا مغناطيسي للعنصر الفيرومغناطيسي. ولقد لقي هذا المبدأ تطبيقاً واسعاً في العديد من الأجهزة الهندسية التي يتحتم استعمال المادة فيها على درجة حرارة أعلى من درجة حرارة كوري، فمثلا، في الموتورات، المولدات، المحولات، الموصلات، والمغناطيسيات الدائمة وغيرها من الأجهزة الكهربائية. ومن الناحية الأخرى يتطلب استعمال سبائك

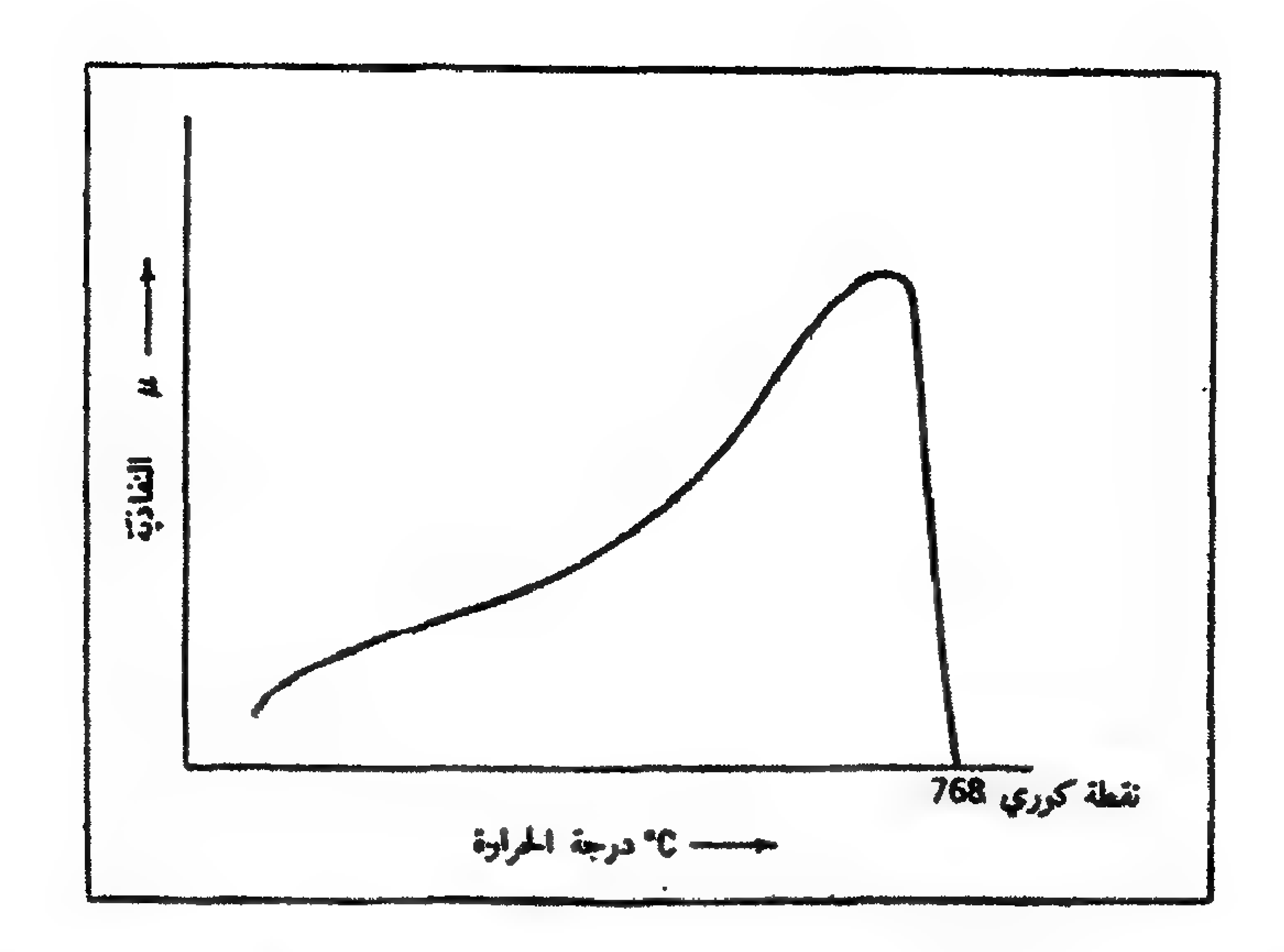
الحديد، النيكل والحديد في بعض الأجهزة مثل أنابيب أشعة المهبط، مطيافات الكتلة وعلب البوصلة، أن يكون لها سلوكا لا مغناطيسياً. لذا يحب أن تكون درجة حرارة كوري للمادة أقل من درجة حرارة الاستعمال الأكثر انخفاضاً. وتستغل أيضاً التغيرات في الخواص المغناطيسية بفعل الحرارة في مختلف أجهزة معادلة التغير في درجة الحرارة أو في إنتاج سبائك تمدد خاصة، ويعتمد سلوك النفاذية على درجة الحرارة إذ ترتفع في القيمة كما زادت درجة الحرارة حتى تصل إلى قيمتها القصوى بالقرب من درجة حرارة كوري، ثم تقل بسرعة فجائية للصفر على درجة حرارة كوري كما يتضح من الشكل (6- 6).



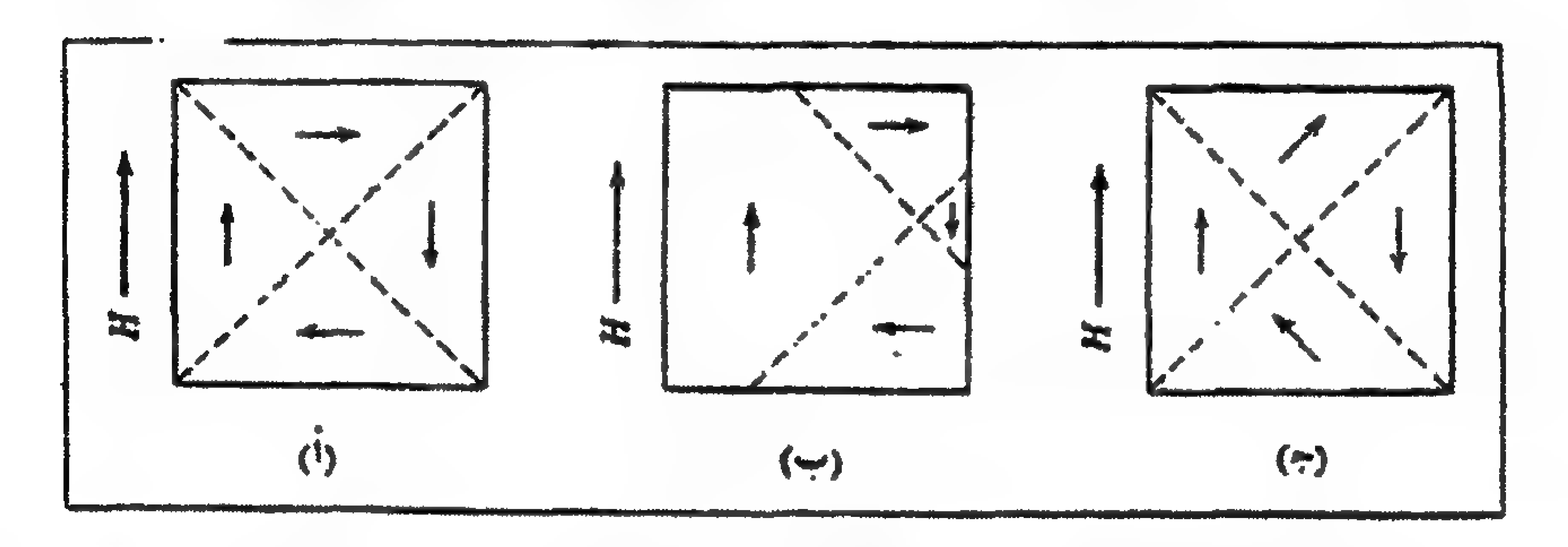
الشكل (5- 6) تمغنط التشبع بدلالة درجة الحرارة في حالة الحديد T_c درجة حرارة كوري الفيرومغناطيسية

6-5 نظرية المناطق المغناطيسية Magnatic Domain Theory :

لقد وضعت نظرية المناطق المغناطيسية من قبل العالم بيير فايّس P. Weiss، وتنص على أن جميع المواد الفيرومغناطيسية تتكون من عدد من البقع الدقيقة المسماة المناطق domain وكل منطقة تحتوي على عزوم ذرية متوازية وتكون دائماً في حالة من التمغنط المشبع. ولا يشترط أن تكون اتجاهات التمغنط للمناطق المختلفة



الشكل (6- 6) النفاذية الابتدائية والنفاذية القصوى للحديد



الشكل (7- 6) عملية التمغنط الأساسية.(أ) غير ممغنطة (ب) ممغنطة بنمو المناطق (إزاحة الحدود) (جـ) ممغنطة بدوران المناطق.

متوازية. وفي غياب المجال المغناطيسي المؤثر، يمكن أن تتجه المناطق المتجاورة عشوائياً في أي عدد من الاتجاهات التي يطلق عليها اتجاهات التمغنط السهل. وتعتمد هذه الاتجاهات على هندسة البلورة وعلى تركيبها البلوري. وربما يكون التأثر الحاصل لجميع هذه الاتجاهات للتمغنط صفراً، كما هو الحال في حالة عينة غير ممغنطة (الشكل 7- 6أ).

وعند تطبيق مجال مغناطيسي على عينة، فإن المناطق الموازية تقريباً لاتجاه المجال المؤثر تنمو في الحجم على حساب المناطق الأخرى. ويسمى هذا بالإزاحة للمناطق أو نمو المناطق (7- 6ب). وعندما يكتمل ذلك، فإن أية زيادة

أخرى في قيمة المجال المغناطيسي تعمل على دوران المناطق وترتيبها باتجاه المجال. عندئذ تصل المادة إلى نقطة التشبع ولا يحصل أي تغير آخر عند زيادة شدة المجال المغناطيسي.

ويمكن تفسير الثلاث مناطق الواقعة في منحنى التمغنط بدلالة نظرية المناطق. فالجزء الابتدائي من المنحنى يقابل الإزاحة الحدودية المعكوسة، والمنطقة الوسطى من المنحنى تقابل الإزاحة الحدودية اللامعكوسة، والجزء العلوي يقابل دوران المناطق.

6-6 المواد المغناطيسية Magnetic materials:

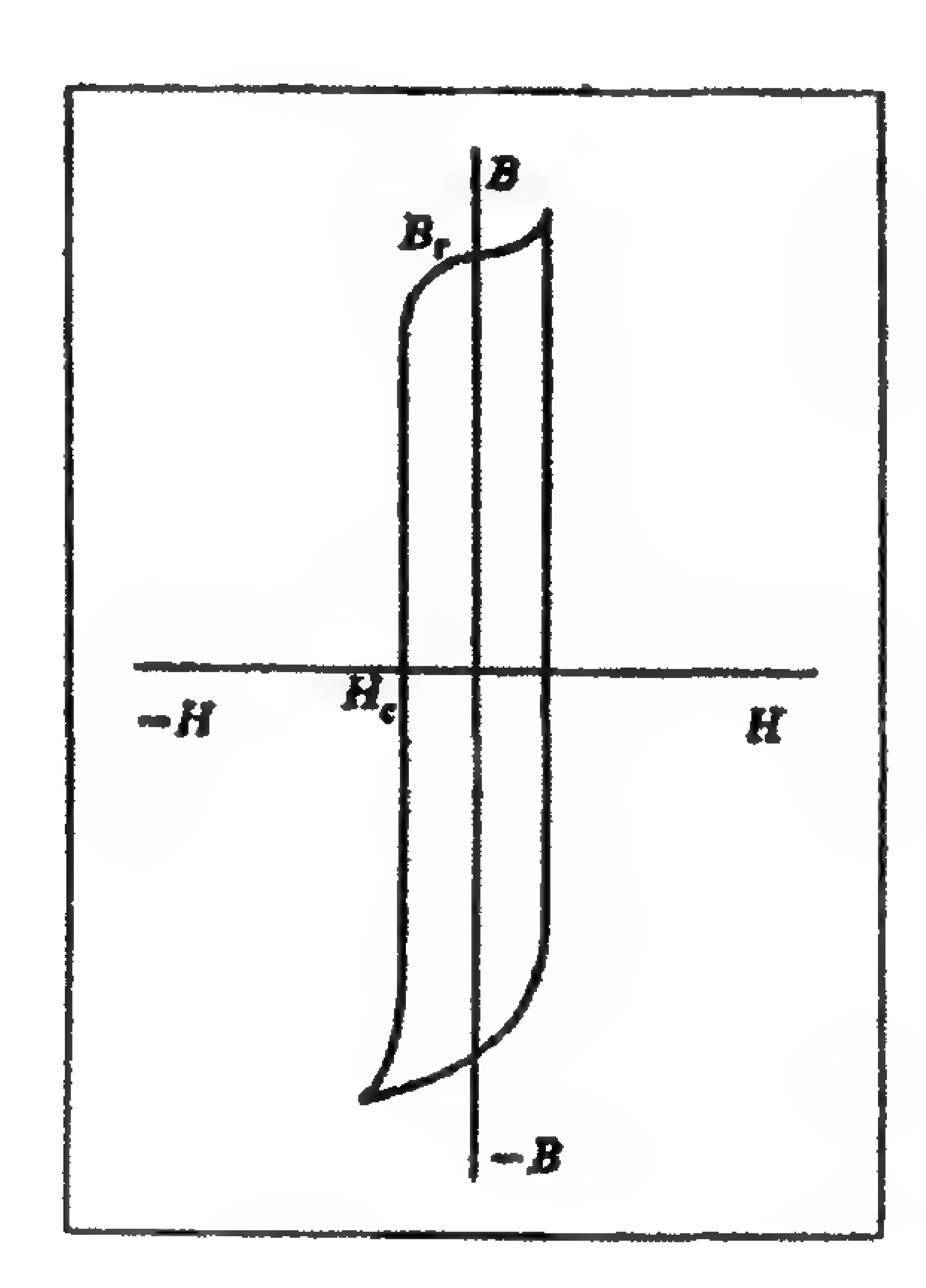
نستطيع تقسيم المواد المغناطيسية إلى مواد مغناطيسية لينة (soft) ومواد مغناطيسية صلدة (hard)، حسب سلوكها في وجود مجال مغناطيسي خارجي. وتتميز المواد اللينة أو النفاذة بأنها تملك نفاذية عالية وقوة قاهرة منخفضة ويمكن مغنطتها وإزالة المغنطة عنها بسهولة. وتستعمل في قلوب المحولات، ودوائر الإغلاق المغناطيسية، والمكبرات المغناطيسية، وفي تطبيقات أخرى تعمل بفعل المجال المغناطيسي المتناوب. وتتميز المواد المغناطيسية الصلدة أو الدائمة بقدرتها على الاحتفاظ بالمجالات المغناطيسية.

ونستطيع الاستنتاج أن الحصول على مجال كافٍ من المغناطيسي وحفظ هذا المجال تحت الظروف الضارة يتطلب وجود قوة قاهرة كبيرة وحث متخلف عالٍ. فإذا كانت النفاذية منخفضة، فإننا نحتاج إلى قوة ممغنطة H كبيرة للوصول إلى تمغنط التشبع للمادة. وأفضل طريقة توضح هذه الاختلافات في الخصائص المغناطيسية للمجموعتين من المواد هي دراسة منحنيات التخلف المغناطيسية لها، والمبينة في الشكلين (8- 6 و 9- 6).

المواد المغناطيسية اللينة أو النفاذة

:Soft or Permeable Magnetic Materials

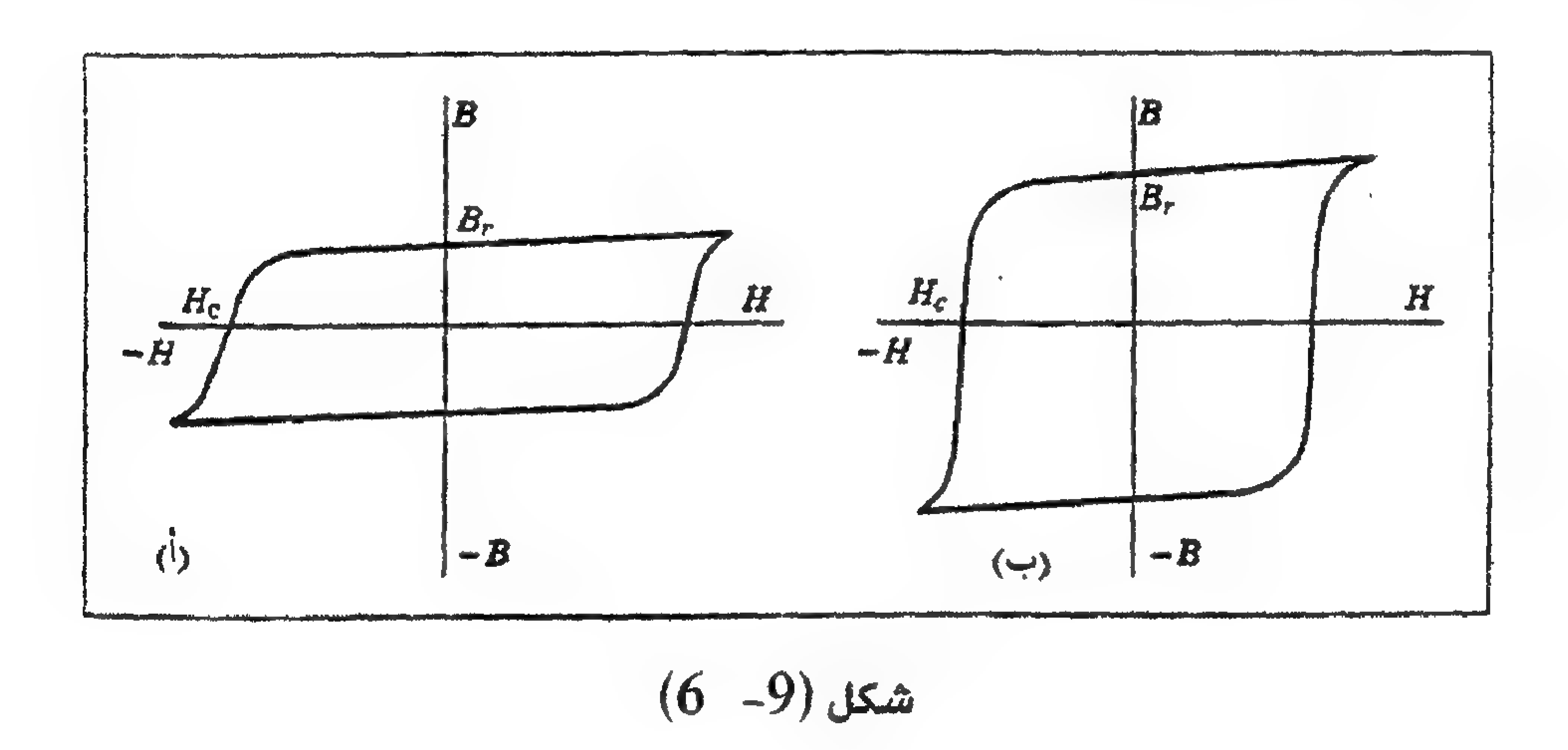
تتميز المواد المغناطيسية اللينة بمنحنى تمغنط حاد الصعود ونفاذيات عالية. وتكون المساحة الواقعة في منحنى التخلف المغناطيسي صغيرة لأن القوة القاهر منخفضة جداً (بالشكل 6- 6). وتؤخذ هذه الخاصية الهامة بعين الاعتبار عند استعمال المادة في تطبيقات التيار المتناوب، لأن مساحة منحنى التخلف المغناطيسي تمثل الطاقة المفقودة على شكل حرارة أثناء دورة واحد. وكلما صغرت المساحة، كلما قلت فواقد القدرة وزادت إمكانية استعمال المجال المغناطيسي عند الترددات المرتفعة. وتتميز المواد المغناطيسية الصلدة بأن مساحة منحنى التخلف المغناطيسي لها تكون أوسع نسبياً وتأخذ شكلاً مربعاً وجه التقريب (9- 6).



الشكل (8- 6) منحنى تخلف مغناطيسي نموذجي لمادة عالية النفاذية. قوة قاهرة H_c صغيرة ومغناطيسية متبقية B_r كبيرة.

وتتأثر النفاذية للقلب المغناطيسي كثيراً بترددات المجال المغناطيسي المتناوب الخارجي، وينتج عن ذلك تيارات دوامية، ولا تعتبر التيارات الدوامية مسؤولة فقط عن فقدان القدرة (الطاقة) ولكنها أيضاً تمنع الفيض المغناطيسي من التغلغل بالكامل في المادة، وبذلك تنقص من قيمة النفاذية الفعالة ونستطيع

تخفيض أو إزالة التيارات الدوامية عن طريق تقليل السمك لقلب المادة وبزيادة مقاومتها النوعية الكهربائية. وبوجه عام، تؤدي الزيادة في المقاومة النوعية الكهربائية لقلب المادة في انخفاض نفاذيتها المغناطيسية. ويمكن تعويض هذا العيب تماماً بواسطة التخفيض الكبير في فواقد التيارات الدوامية. وتصنع الآن معظم مواد القلب من صفائح رقيقة للغاية تؤخذ من فلز أو سبيكة نفاذية. ثم يجمع هذه الصفائح معاً لتشكل قلباً طبقياً حسب السمك المطلوب. وهذه الصفائح معزولة كهربائياً. وقد تمكن العلماء من صناعة صفائح قلوب من مساحيق فلزية دقيقة جداً ومساحيق (فريت خزفية) دقيقة جداً ومخلوطة مع مادة لاصقة عضوية أو غير عضوية وعازلة بحيث تعزل الحبيبات كهربائياً عن بعضها البعض وذلك لمنع حدوث أية تيارات دوامية.



شكل (9- 6)

6-7 المواد المغناطيسية الدائمة

يتم تعين المواد ذات المغناطيسية الدائمة بعد الأخذ بعين الاعتبار القيم القصوى المسموح بها أو المرغوب بها من القوة القاهرة والحث المغناطيسي المتخلف.

وتعتبر سبائك (الفولاذ المنخفض الكربون) أكثر المواد دائمة المغناطيسية انتشاراً. حيث أنها تحتوي على كربون بنسبة تتراوح بين 0.6 إلى 1٪ وكذلك تكون قد تمت تقسيتها وهناك مجموعة أخرى هامة من هي سبائك ألمنيوم – نيكل

– حديد. مع كميات صغيرة من الكوبلت وتعرف باسم سبائك النايكو Alnico.
وتكون المواد دائمة المغناطيسية عادة عالية الصلادة وهشة وصعبة التشكيل. وهناك سبائك أخرى أكثر مطيلية (أقل هشاشة) مثل سبيكة نحاس – نيكل – حديد (Cunife) وسبيكة نحاس – نيكل – كوبلت cunico حيث يمكن إجراء عمليات التشكيل والخراطة على هذه السبيكة وإنتاجها بالشكل المطلوب.

الوحدة السابعة

الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية

Mechanical Properties of Materials

يمكن تعريف الخواص الميكانيكية بأنها الخواص التي تتعلق بسلوك المادة عند تعريضها للأحمال المؤثرة سواء كانت هذه الأحمال استاتيكية أو ديناميكية أو متكررة.

كما أن الخواص الميكانيكية تستخدم كأساس للمقارنة بين المواد النسبية المختلفة، وفيما يلي موجز عن أنواع الأحمال وتعاريف لبعض الخواص الميكانيكية للمواد.

4-1 أنواع التحميل Types of Loading :

يمكن تقيم الطرق التي تؤثر على المادة إلى الأنواع الثلاثة الآتية:

1. التحميل الإستاتيكية Static Loading :

وهي الطريقة التي يكون فيها تأثير الحمل بطيئاً ويزداد تدريجياً حتى يصل إلى قيمته القصوىبدون إحداث أي صدم أو اهتزاز، مثل اختبار الشد للمعادن، وفيه تحمل قطعة الاختبار بحمل شد محوري، ويزداد ببطء وتدريجياً حتى تنكسر قطعة الاختبار.

كما أن التحميل المستمر (Continuos Loading) او بقاء الحمل مؤثراً مدة طويلة من الزمن يعد تحميلاً استاتيكياً.

2. التحميل الديناميكي Dynamic Loading :

وهي الطريقة التي يؤثر فيها الحمل على المادة بحيث يحدث فيها صدم أو اهتزاز. وتؤثر هذه الأحمال الديناميكية في مدة قصيرة نسبياً. ويختلف هذا النوع

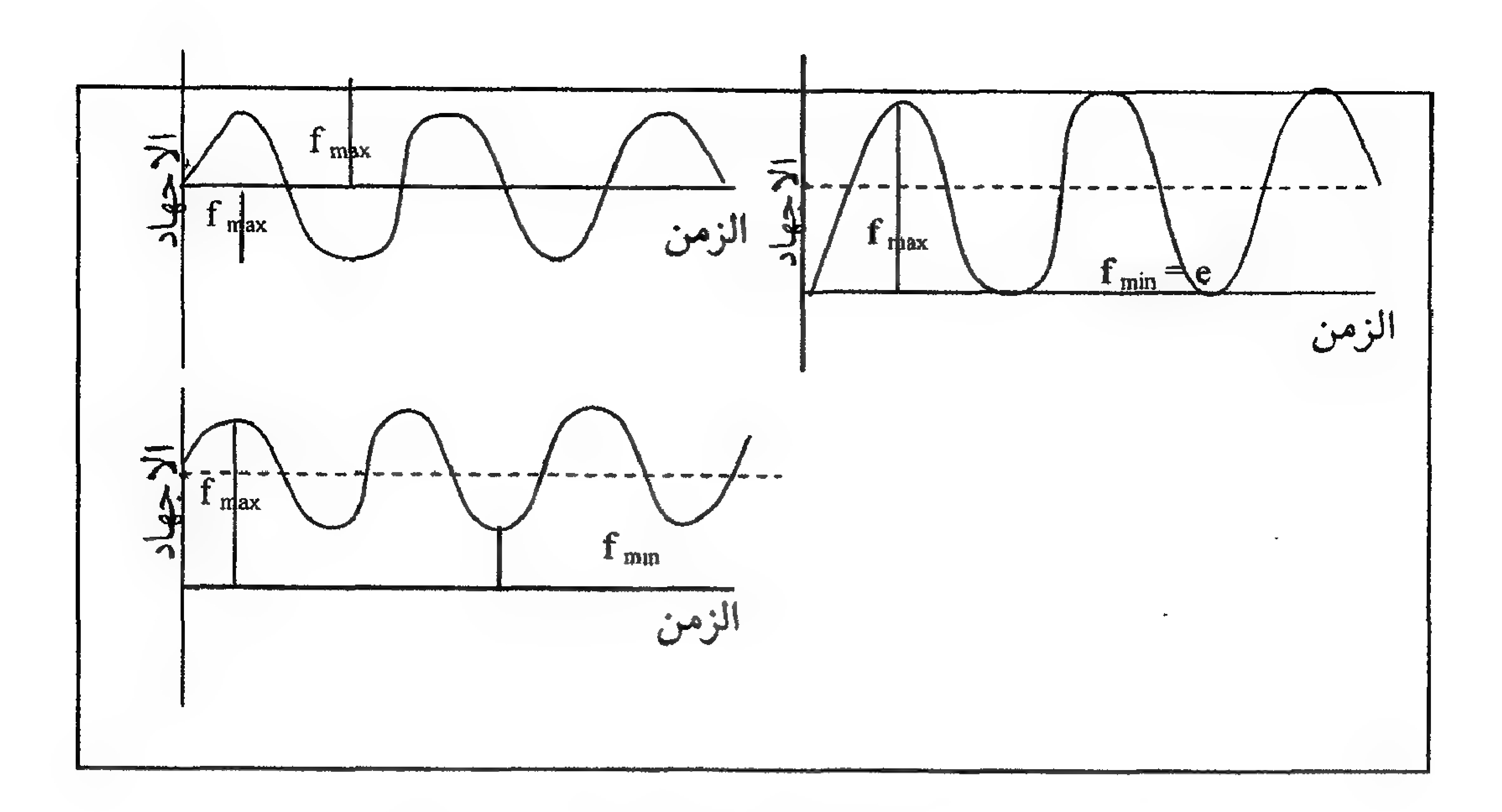
من التحميل عن التحميل الاستاتيكي في أن الاجهادات الناتجة تكون أعلى من الاجهادات الناتجة تحت تأثير حمل بطئ له نفس القيمة، ويعرف مقدار الحمل الاستاتيكي الذي يعطي نفس الاجهاد الناتج من الحمل الديناميكي بالحمل الاستاتيكي المكافئ، كما تعرف النسبة بين قيمة الحمل الاستاتيكي المكافئ، وقيمة الحمل الديناميكية بعامل الحمل (Load Factorr) ومن امثلة الأحمال الديناميكية حمل الجسم المتحرك عند اصطدامه بجسم آخر (مثل هبوط الطائرة على أرض المطار).

3. التحميل المتكرر Repeated Loading:

إذا تعرض عضو أو منشأ لتأثير حمل مرات عديدة فإن العضو أو المنشأ في هذه الحالة يكون معرضاً للتحميل المتكرر. ويعتبر التحميل المتكرر ذات أهمية كبيرة إذ قد تتحمل المادة إجهاداً معيناً إذا كان الحمل مؤثراً لمرة واحدة، بينما قد تنهار هذه المادة تحت تأثير نفس الحمل أو أقل منه لو كان مكرراً، أي مؤثراً لمرات عديدة.

ويسبب التحميل المتكرر إجهادات متغيرة غالباً في حدود معينة كالآتي (شكل (1- 7).

1. إجهادات تتغير من قيمة قصوى في الشد إلى قيمة قصوى في الضغط.
2. إجهادات تتغير من قيمة قصوى إلى قيمة تساوي صفراً.
3. إجهادات تتغير من قيمة قصوى إلى قيمة أقل ولكن أعلى من الصفر.



بضع دورات إجهادات التحميل المتكررشكل (1- 7)

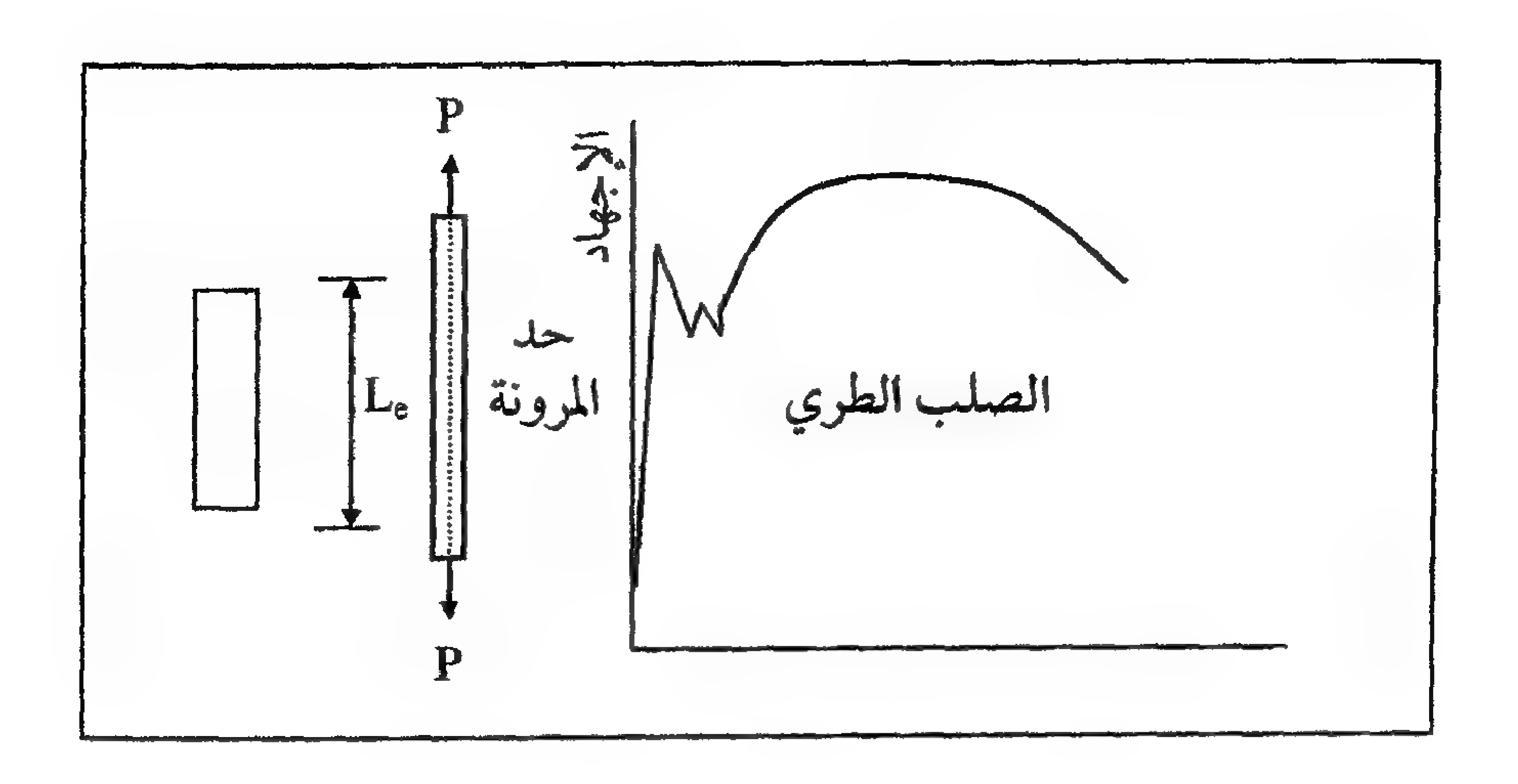
4-2 الخواص الميكانيكية الرئيسية:

تعتبر الخواص الآتية هي الخواص الميكانيكية الرئيسية:

1. المرونة Elasticity :

هي قدرة المادة على استعادة أبعادها الأصلية أي عدم بقاء أي تشكل دائم بعد زوال الحمل المؤثر. ومن الوجهة الهندسية فدليل المرونة ليس بمقدار التغيرات التي تحدث للمادة تحت تأثير الحمل، وإنما تعتبر الاستعادة التامة للأبعاد الأصلية للمادة عند زوال الحمل المؤثر هي الدليل على المرونة فقط.

ويعرف إجهاد حد المرونة (Elastic Limit Stress) بانه اكبر إجهاد تتحمله المادة بشرط عدم بقاء أي تغير دائم في الشكل عند زوال هذا الإجهاد (شكل رقم 2- 7).



العلاقة بين الاجهاد والانفعال لعينة من الصلب الطري في الشد

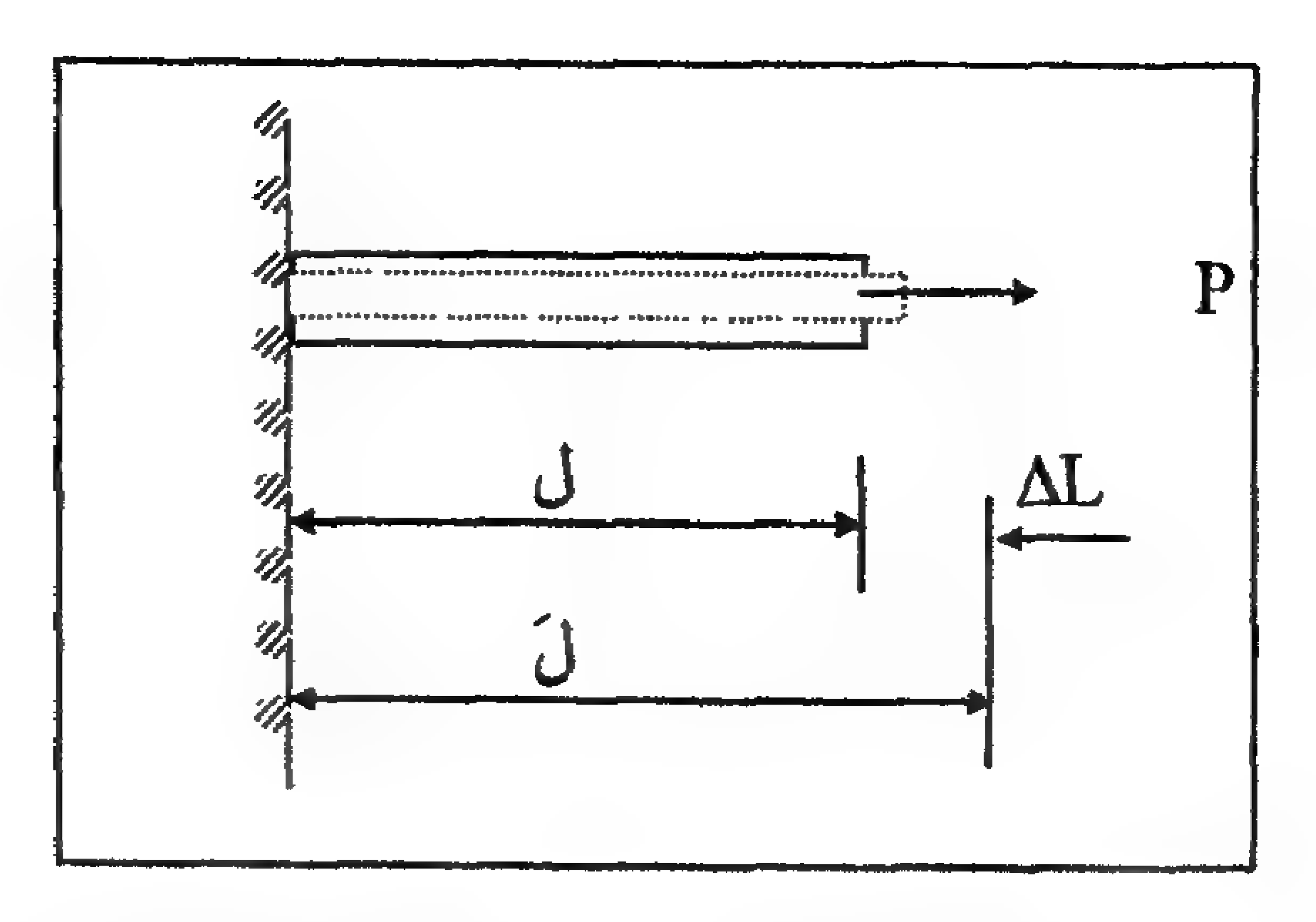
شكل (2- 7)

2. اللدونة Plastity :

هي قدرة المادة على أن يكون لها تشكل دائم أي لا تسترجع المادة أبعادها الأصلية بعد إزالة الحمل المؤثر. وتعتبر خاصية اللدونة ذات أهمية كبرى في عمليات التشكيل المختلفة للمعادن.

3. المطولية Ductility:

يمكن تعريفها بأنها الخاصية التي تسمح للمادة بتغير لدن كبير تحت تأثير حمل الشد أي قدرة المادة على السحب وقابليتها للاستطالة الكبيرة عند تعريضها لحمل الشد، (شكل رقم 3–7) وتقاس ممطولية المادة بما يأتي:



التغير في الطول لمادة مطلية تحت تأثير الشد

شكل رقم (3- 7)

أ. **النسبة المئوية للاستطالة** = $\frac{\text{الزيادة في طول القياس}}{\text{طول القياس}}$

$$= \frac{لَ - ل}{ل} \times 100$$

حيث ل = طول القياس، لً = طول القياس بعد الكسر.

ب. **النسبة المئوية للنقص في مساحة المقطع** = $\frac{\text{النقص في مساحة المقطع}}{\text{مساحة المقطع الأصلية}} \times 100$

$$= \frac{مَ - م}{م} \times 100$$

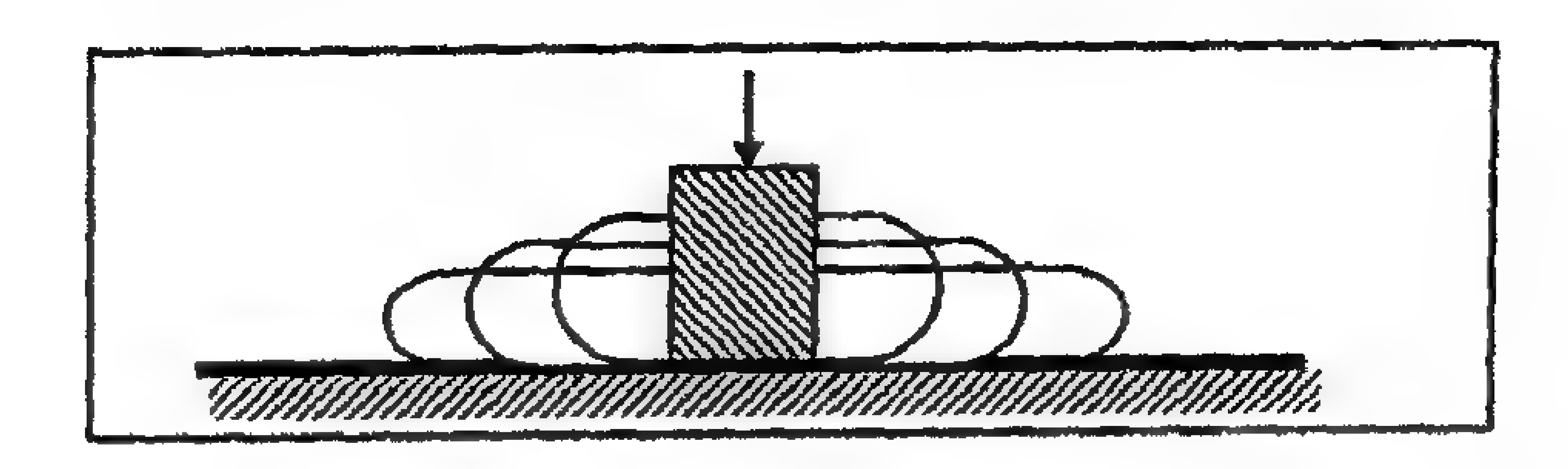
حيث م = مساحة المقطع الأصلية ، مً = مساحة المقطع بعد الكسر.

ج. **عامل الاستطالة** = $\frac{م - مَ}{مَ} \times 100 < 100$

د. **الثني على البارد ومقاومة حدوث كسر أو شرخ في أي جزء من عينة الاختبار.**

4. الطروقية Malleability :

هي قدرة المادة على أن يحدث لها تغيرات لدنة كبيرة تحت حمل الضغط، أي قدرة المادة على التفلطح بالطرق بدون حدوث كسر (شكل 4- 7).



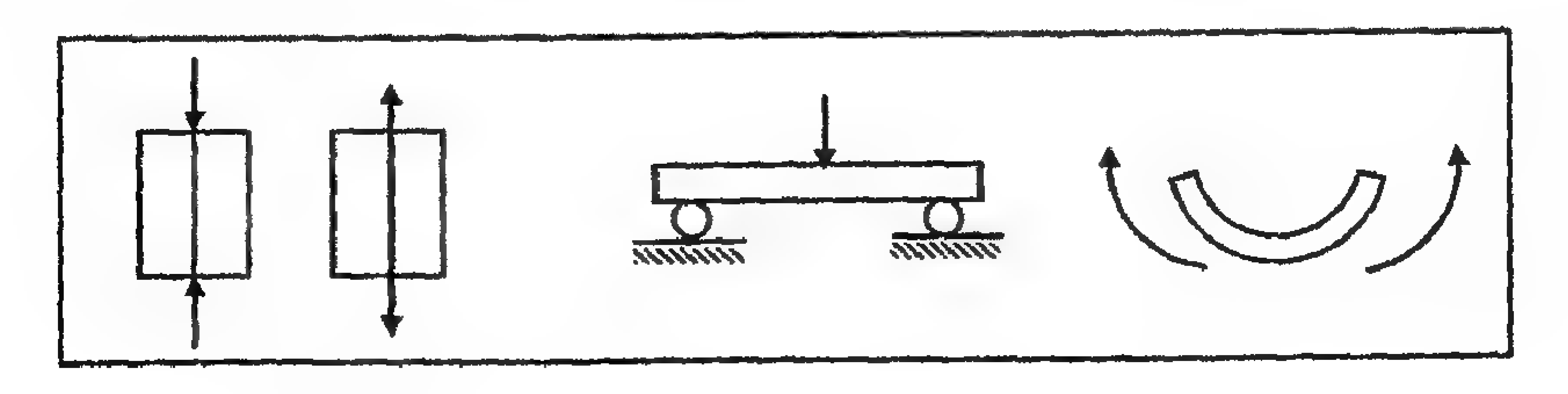
شكل (4- 7) مادة طروقة تحت تأثير حمل الضغط

5. التقصف Brittleness :

هي الخاصية التي تجعل المادة تنكسر قبل حدوث تغير ملحوظ في الشكل مثل الحديد الزهر والخرسانة فإنها تنكسر تحت تأثير الحمل دون أن يحدث لها تغير ملحوظ في الشكل كذلك الزجاج يعتبر مادة قصفة ويعتبر التقصف عكس المطولية.

6. المقاومة Strength :

هي مقاومة المادة لأي حمل مؤثر، وتعرف بالمقاومة للضغط إذا كان الحمل المؤثر حمل ضغط، والمقاومة للشد إذا كان الحمل المؤثر حمل شد. وتقاس المقاومة بوحدات الإجهاد. كما أن المقاومة قد تكون للانحناء (شكل 5- 7) وتعرف أقصى مقاومة بأنها أكبر إجهاد تتحمله المادة تحت تأثير الحمل المؤثر ببطء حتى الكسر.



تحميل الشد والضغط والانحناء شكل (5- 7)

7. الصلابة (الكزازة) Stiffness:

هي خاصية مقاومة المادة لأي نوع من التغير الشكل، وتعرف المادة الصلبة بأنها المادة التي تتحمل وحدة إجهاد عالية مع حدوث تغير صغير نسبياً في الشكل. وتقاس الصلابة بمقدار معامل المرونة – (معامل يونج للمرونة) – في اختبار الشد والضغط المحوري وهو مقياس الصلابة في حدود المرونة. ومعايير على الزيادة في الانفعال المقابل له وذلك في الجزء المستقيم من الرسم البياني للاجهاد والانفعال كما هو مبين بالشكل (6- 7).

$$\text{معامل المرونة} = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال}} = \text{ظا}\ \theta$$

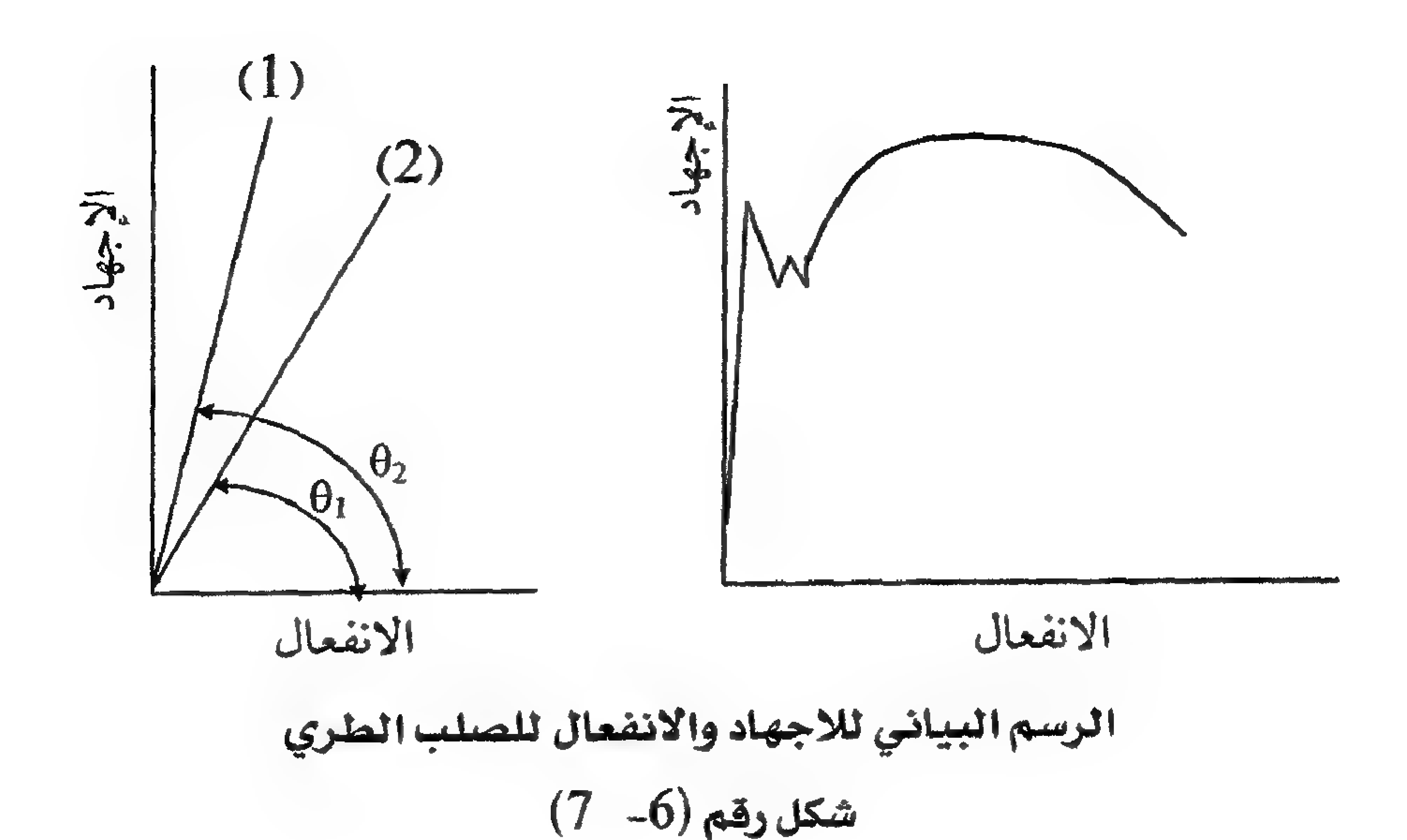
∴ معامل المرونة للمادة (1) = ظا θ_2

معامل المرونة للمادة (2) = ظا θ_1

وحيث أن ظا θ_2 > ظا θ_1

∴ معامل المرونة للمادة (1) > معاير المرونة للمادة (2).

∴ المادة (1) أصلب من المادة (2)



الرسم البياني للاجهاد والانفعال للصلب الطري

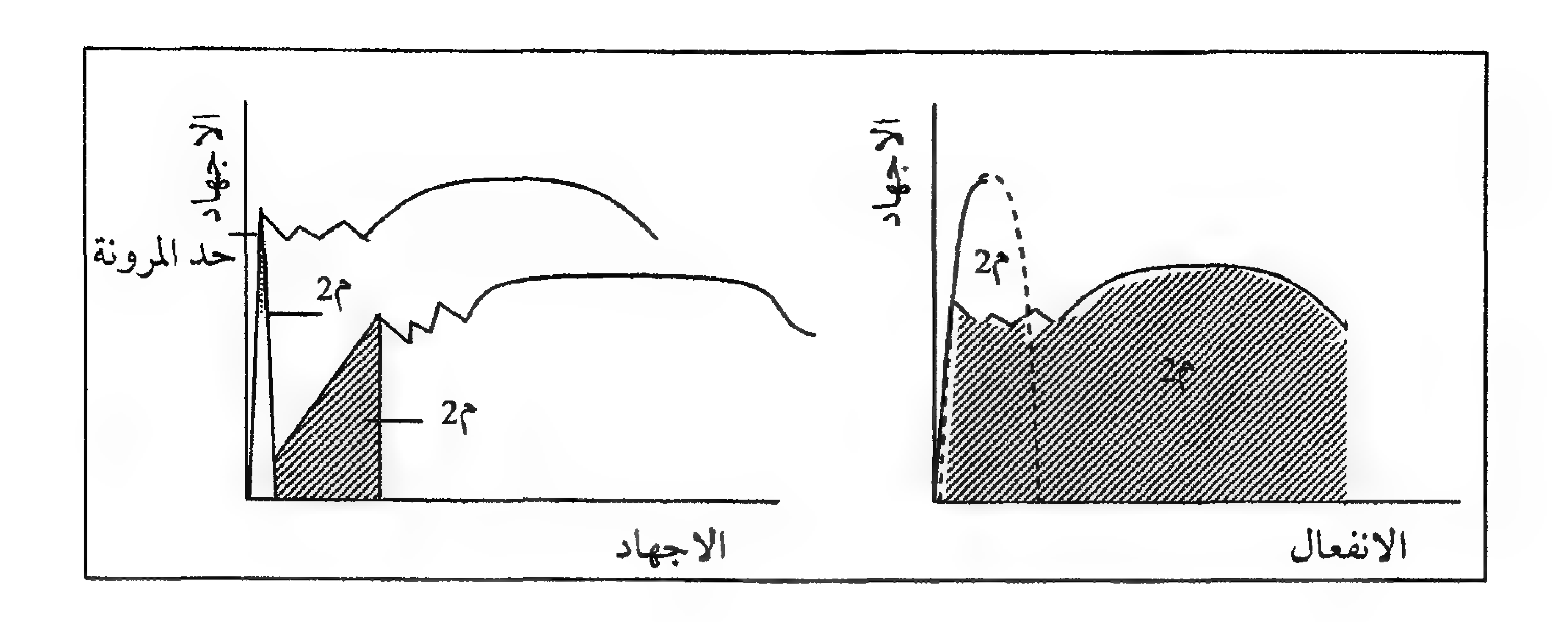
شكل رقم (6- 7)

8. المتانة Toughness :

هي قدرة المادة على مقاومة الأحمال الديناميكية أي مقدرتها على مقاومة الصدمات وامتصاص الطاقة الميكانيكية، ويقصد بالمادة المتينة بأنها المادة التي تتحمل إجهاداً مناسباً مع تغيير كبير في الشكل بدون كسر. وتقاس المتانة بمقدار الطاقة المؤثرة على منحنى الاجهاد والانفعال للمادة كما بالشكل (6- 7).

9. الرجوعية Resillence :

هي قدرة المادة على امتصاص الطاقة المرونة التي تختفي تماماً بعد زوال الحمل المؤثر. ويعرف معاير الرجوعية بأنه أكبر كمية من الطاقة الميكانيكية التي تختزن في وحدة الحجوم من المادة وتسترجع ثانية بمجرد إزالة الحمل المؤثر. ويعين مقدار معاير الرجوعية للمادة بحساب المساحة التي تحت منحنى الإجهاد والانفعال المحصور بين الصفر وإجهاد حد المرونة كما هو مبين بالشكل (7- 7).



معامل الرجوعية (م) | معامل المتانة (م)

شكل رقم (7- 7) | شكل رقم (6- 7)

10. الصلادة Hardness :

صلادة المادة هي الخاصية التي تمكنها من الاحتفاظ بشكل سطحها سليماً متماسكاً تحت تأثير الأحمال. وقد تعرف الصلادة بأنها قدرة المادة لمقاومة البري نتيجة الاحتكاك أو المقاومة للخدش أو القطع أو حدوث علامة بها، ولكن هذا التعريف لا يمكن اعتباره عاماً حيث أن بعض المعادن (مثل الصلب المنجنيزي) لها مقاومة قليلة لحدوث العلامة بها بينما لها قدرة عالية على المقاومة للبري، وعلى ذلك فلا يوجد حتى الآن تعريف أساسي عام يحدد خاصية الصلادة وينطبق على كل المعادن، ولكن عرفت أنواع مختلفة من الصلادة طبقاً للطرق المستخدمة في المقارنة بين الصلادة النسبية للمعادن ومنها ما يأتي:

أ. صلادة العلامة Indentation Hardness:

وهي خاصية مقاومة المعدن لحدوث العلامة بسطحه نتيجة تحميله بحمل استاتيكي أو ديناميكي.

ب. صلادة الارتداد Rebound Hardness:

وهـي خاصـية قـدرة المعـدن علـى الرجوعيـة (Resilience) أي امتـصاص الطاقة وإعادتها ثانية للأحمال المؤثرة مسببة ارتداداً لها تكبر قيمته كلما كبرت صلادة المعدن .

ج. صلادة الخدش Scratch Hardness :

وهي خاصية مقاومة سطح المعدن للخدش.

د. صلادة البري Wear Hardness:

وهي خاصية مقاومة المعدن للبري نتيجة للاحتكاك.

ه. صلادة التشغيلية بالمكنات Merchantability Hardness:

وهي خاصية مقاومة المعدن للتشغيل بالمسكنات مثل عمليات القطع والثقب والقص.

11.الاحتمال (التحمل) Endurance:

هي خاصية المادة التي تمكنها من مقاومة الأحمبال المؤثرة مرات عديدة أي قدرة المادة على مقاومة الأحمال المتكررة. ويعرف حد الاحتمال بأنه أكبر إجهاد متكرر يمكن تعريض المادة له عدداً لا نهائياً من المرات دون أن يسبب انهيار للمادة.

- الاجهاد (Stress σ) : هو القوة المسلطة على وحدة المساحة وله وحدات م^2/نيوتن.

12. الليونة:

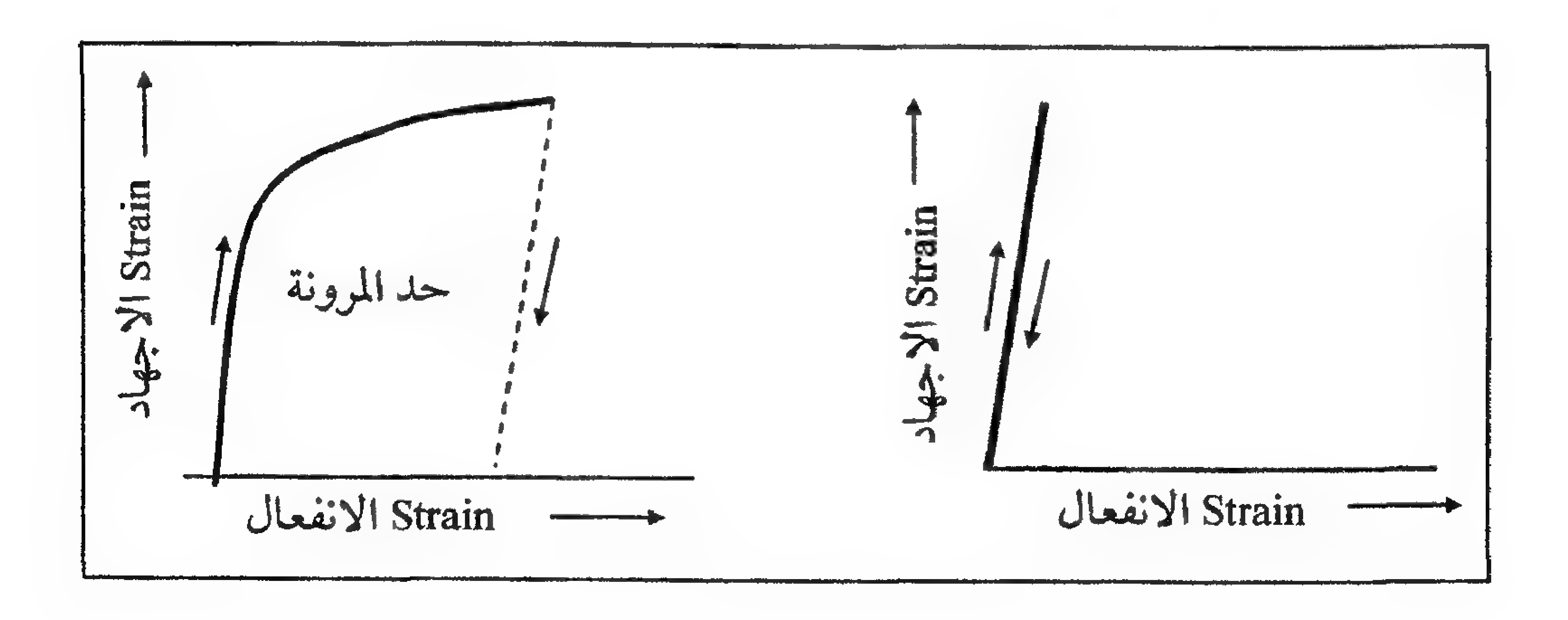
وهـي خاصـية عـدم مقاومـة المادة لأي نـوع مـن أنـواع التـشكل وهـي تعكـس خاصية الصلابة

- **الانفعال (Strain ∈) :** هو الاستطالة الناتجة عن تسليط القوة بطريقة الـشد و الـتقلص النـاتج هـن تـسليط القـوة بطريقـة الانـضغاط ويعـرف بطريقتين:

1. الاستطالة أو التقلص بالأمتار لكل متر من الطول الأصلي $\frac{\Delta L}{L}$.
2. النسبة المئوية للاستطالة بالنسبة للطول الأصلي.

ويكون الانفعال على نوعين: الانفعال المرن والانفعال اللدن.

الانفعال المرن (أو الانفعال التناسبي) يكون ذو خاصية عكسية حيث يتلاشى الانفعال بعد إزالة الإجهاد المسلط وقيمة الانفعال هنا تتناسب طردياً مع مقدار الاجهاد المسلط كما في الشكل رقم (8- 7).



شكل رقم (8- 7) الانفعال المرن　　　　شكل رقم (9- 7) الانفعال اللدن

الانفعال باللدن هو انفعال ثابت غير عكسي يحدث للمادة نتيجة الاجهاد المسلط بعد حد المرونة كما في الشكل رقم (9- 7).

ويكون الانفعال اللدن نتيجة إزاحات دائمية للذرات داخل المادة بعكس الانفعال المرن الذي لا يحدث إزاحات دائمية للذرات ويبقى لكل ذرة نفس الذرات المجاورة لها قبل وبعد الانفعال.

معامل يونغ (معامل المرونة) (E) : Modu lus of elasticity

وهو النسبة بين الإجهاد والانفعال ضمن منطقة حد المرونة.

$$\text{معامل المرونة} = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال}}$$

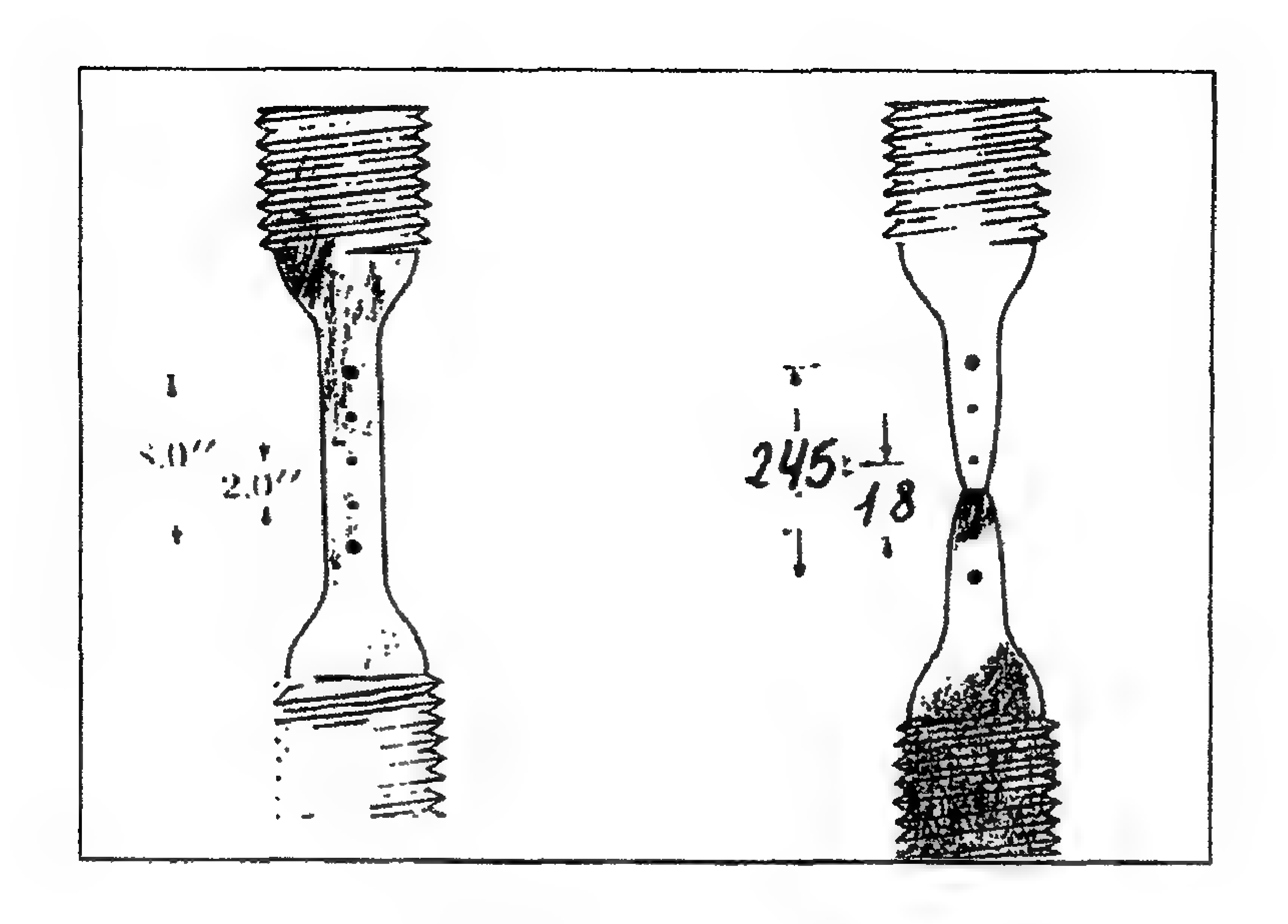
$$E = \frac{\sigma}{\in}$$

وتسمى المعادلة أعلاه معادلة يونغ

13. المطيلية Ductility :

وهي كمية التشوه اللدن التي تحدث عن نقطة التمزق Repture وتحسب كمية التشوه هذه من الاستطالة الناتجة. وللمطيلية نفس وحدات انفعال الشد نيوتن/ متر.

وهناك عدة أطوال للمعيار القياسي متعارف عليهم (50، 80، 100) ملم وهو كما في الشكل (10- 7) وقيمة المطيلية تعتمد على طول المعيار حيث أن التشوه اللدن يكون مركزياً. لذا يجب ذكر طول المعيار عند إعطاء قيمة المطيلية وبدون ذكر المعيار لا يكون هناك معنى لقيمة المطيلية.



شكل رقم (10- 7)

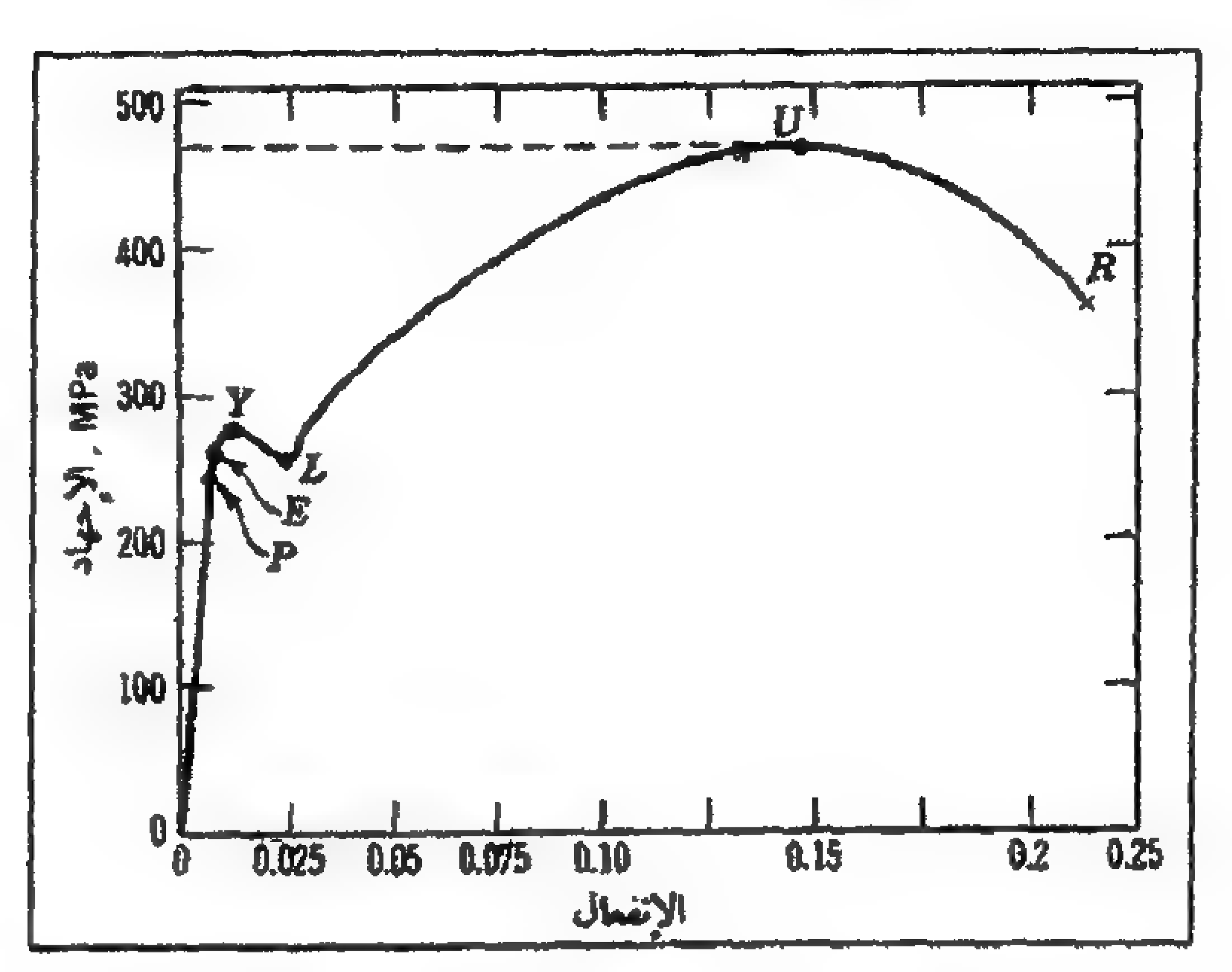
معيار الاستطالة يجب ذكر طول المعيار حيث أن نسبة الاستطالة تختلف حسب طول المعير الأصلية.

طول المعيار	الاستطالبة
200 ملم	٪22.5
50 ملم	٪ 56.0

4-3 منحنى الاجهاد – الانفعال Stress – Strain diagram :

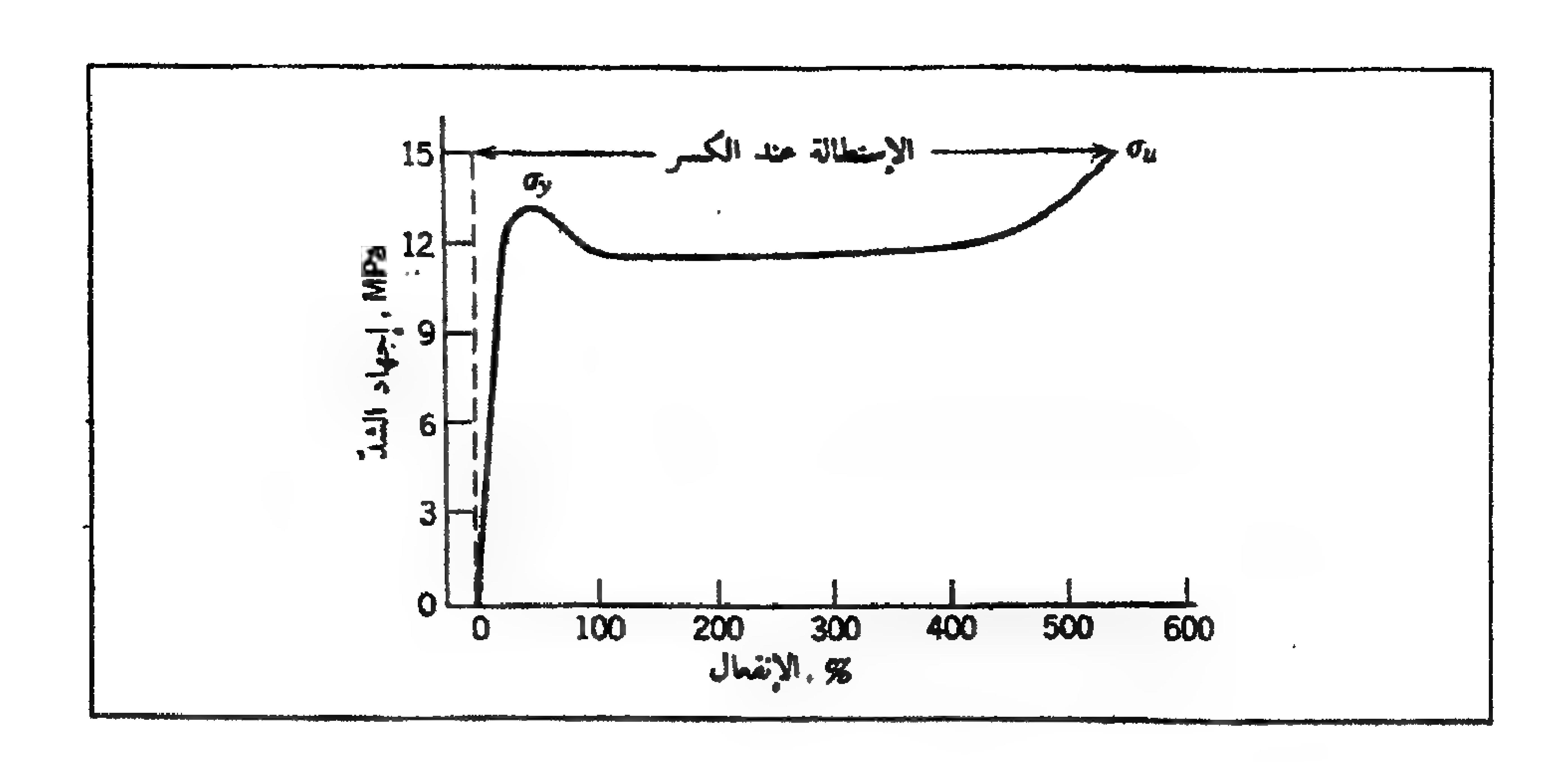
يبين الشكل (11- 7) منحنى إجهاد – انفعال نموذجي لمادة مطيلية dueltile هي الفولاذ الطري- ويمكن أن نرى أن الخط OP يمثل علاقة خطية بين الاجهاد والانفعال. وتسمى النقطة P (نهاية الخط المستقيم) حد التناسب الذي ينطبق عندها قانون هوك. ويعتبر ميل هذا الخط مقياس لمتانة المادة. وتعرف النسبة بين الاجهاد والانفعال ضمن الخط المستقيم OP بمعامل المرونة في الشد أو معادل يونغ (E). وحد المرونة هو أكبر إجهاد يمكن أن تتحمله المادة دون الاحتفاظ

بأي تشوه دائم بعد زوال الحمل، حيث تعود المادة إلى حالتها الأصلية. وتكون نقطة حد التناسب قريبة جداً من نقطة حد المرونة ويمكن اعتبارهما قيمة واحدة. تعرف النقطة Y بنقطة الخضوع العليا والنقطة L نقطة الخضوع السفلى ويقابل النقطة Y الاجهاد اللازم لتحرير الانخلاعات، بينما يقابل L الاجهاد اللازم لتحريك البلورات خلال الشبيكة.



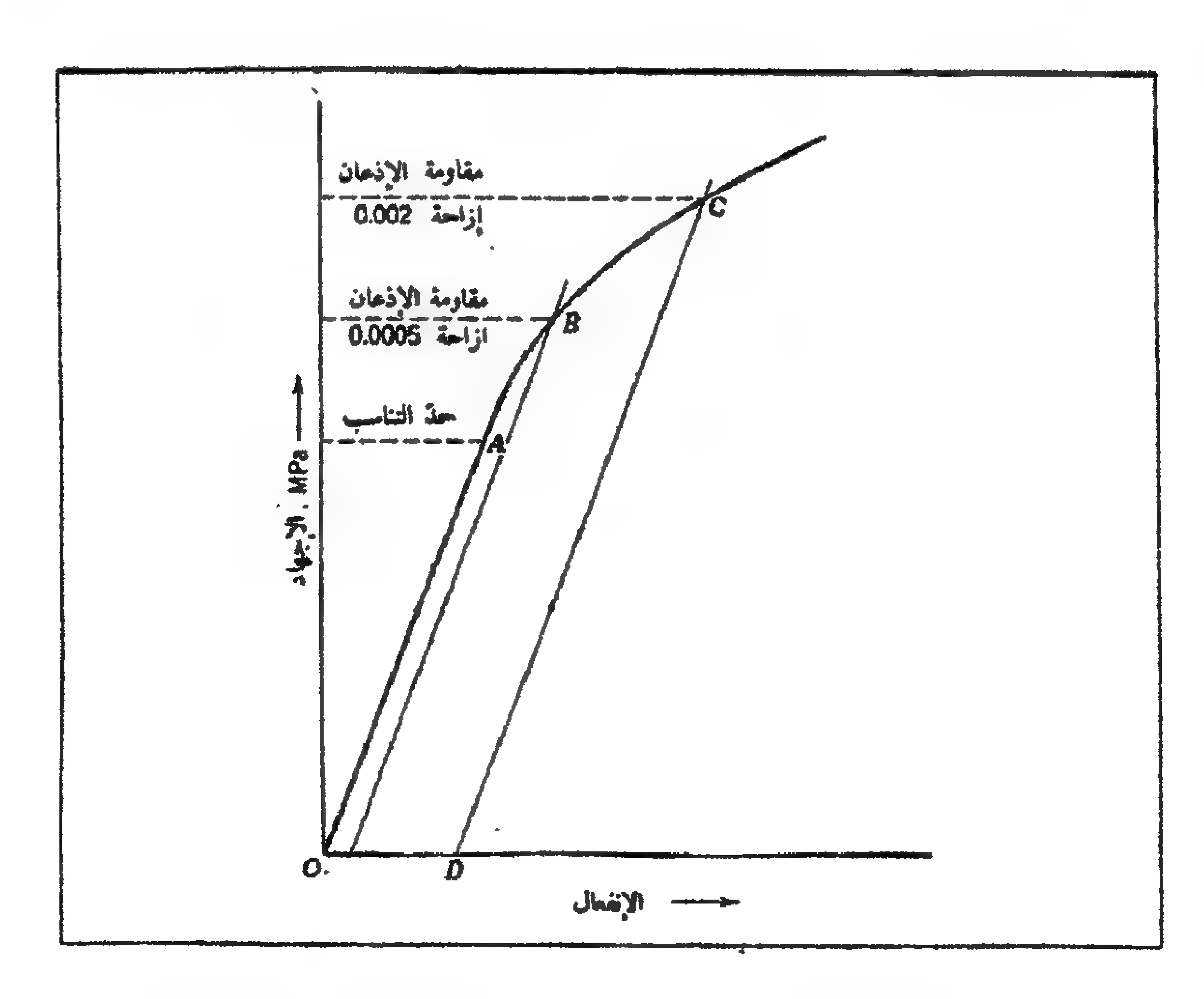
الشكل (11- 7) منحنى إجهاد – انفعال عند فحص فولاذ لين بواسطة الشد

ويمثل الجزء الذي يلي نقطة الخضوع السفلى المدى اللدن أو الجزء اللدن من المنحنى حيث يزداد معدل التشوه أكبر من معدل زيادة الاجهاد. وتستخدم النقطة العليا Y لتعريف إجهاد الخضوع. وعند استمرار إجراء اختبار الشد للعينة بعد نقطة الخضوع يزداد الاجهاد حتى يصل إلى الحد الأعلى ممثلاً بالنقطة U وهي الحد الأعلى لمقاومة المعدن Ultimate Strength. ويعرف الاجهاد عند النقطة R بحد الكسر أوجد الانهيار. وتتميز الاستطالة التي تحدث للعينة بعد نقطة الخضوع بأنها غير قابلة للاستعادة (التشوه اللدن) ويبين الشكل (12- 7) منحنى اجهاد آخر مادة ثيرموبلاستيكية. حيث يختلف هذا المنحنى عن السابق في أن المادة تظهر تشوهاً أو انسيابياً لدناً دون إظهار أي من ظواهر التقسية أو الانفعال وهناك عدة مواد لا تظهر نقاط خضوع مميزة مثل الفولاذ المقسى، الحديد الزهر والفولاذ الذي لا يصدأ. والعديد من الفلزات الغير حديدية مثل الالمنيوم والنحاس والنحاس الأصفر. ولقياس تشوه هذه المواد فإنه يلتزم استخدام الخاصية المسماة قوة الخضوع أو الاجهاد الصمود.



الشكل (12- 7) منحنى إجهاد – إنفعال لبلمر البوليثيلين. σ_r مقاومة الإذعان، σ_u المقاومة ذات الحد الأعلى (القصوى)

وهو الاجهاد اللازم لإحداث انفعال (تشوه) دائم. ويتم تعيين ذلك عن طريق الإزاحة كما في الشكل (13- 7). وتتلخص الطريقة برسم خط (DC) يوازي OA على مسافة 0.002 ليتم تحديد إجهاد مقاومة الخضوع عند النقطة C



الشكل (13- 7) تعيين اجهاد الصمود (Proof stress determination)

قانون هوك Hookes Law:

يمثل الجزء المستقيم من منحنى الاجهاد – الانفعال علاقة خطية بين الاجهاد والانفعال ويكون هذا الخط ذو ميل ثابت.

وميل هذا الخط.

$$\text{ظا}\,\theta = \frac{\text{المقابل}}{\text{المجاور}} = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال}} = \text{ثابت}$$

وهذا الثابت هو معامل المرونة (E)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

مقاومة الشد Tensile Strength:

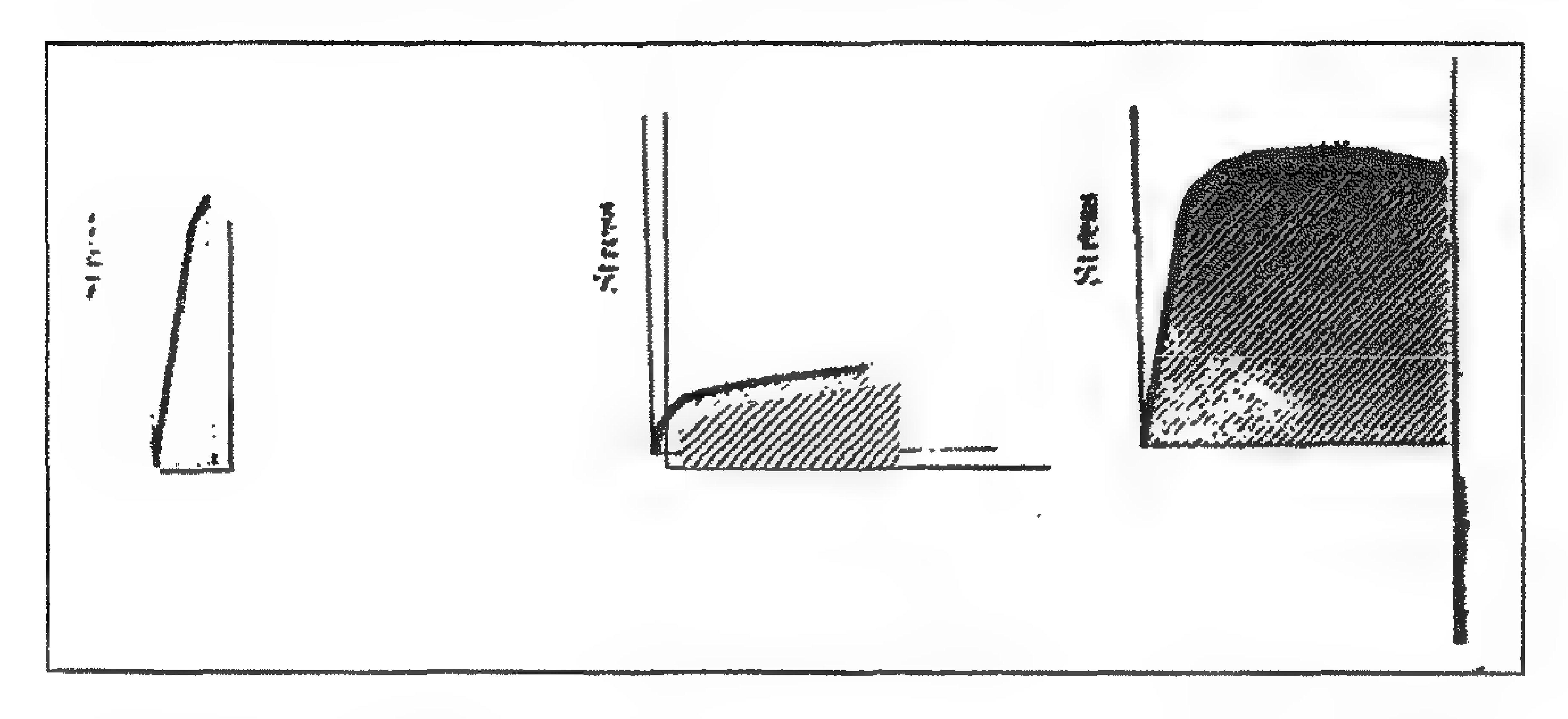
- تحسب مقاومة الشد للمادة بتقسيم القيمة العليا للحمل على مساحة المقطع العرضية الأصلية وتسمى هذه مقاومة الشد الهندسية أما مقاومة الشد الحقيقة للمادة فيحسب بالتقسيم على مساحة المقطع الحقيقية. وبما أن مساحة المقطع العرضية للمواد المطيلية تتناقص قبل تمزقها فإن مقاومة القطع (Breaking Strength) تكون أقل من مقاومة الشد.

الصلادة Hardness:

تعرف الصلادة بمقاومة للمادة للاخترافات على سطحها الخارجي. وهناك طرق مختلفة تمثل دليل الصلادة Hardness Index بينها رقم البرينيلية Brinell Hardness Number ويحسب من مساحة الثلم الناتج عن اختراق مثلم Indenter كبير ذو رأس كروي من الفولاذ الصلب أو معدن التنكستن تحت حمل قياسي Standarized Load. وهناك دليل الصلادة لركويل Rockwell Hardness الشائع الاستعمال بين المهندسين والذي فيه يقاس عمق اختراق مثلم قياسي صغير لسطح المعدن.

العسو Toughness :

العسو هو قياس الطاقة اللازمة لتمزيق المادة. والطاقة هي حاصل ضرب القوة × المسافة ولها وحدات (نيوتن. متر). والمساحة تحت منحني الاجهاد والانفعال تمثل كمية عسو كما في الشكل (14- 7) لمواد مختلفة.



شكل (14- 7) المساحة تحت منحنى الاجهاد والانفعال تمثل العسو

الزحفان Creep:

يمكن تعريف الزحفان (أو الزحف) بأنه عملية تشوه تدريجي يقع ببطء مع الزمن بفعل إجهاد ثابت. وقد شوهدت ظاهرة الزحفان في الفلزات، البلورات الأيونية والتساهمية، والمواد المتحولة مثل الزجاج والمبلمرات. وتظهر الفلزات عادة عند درجة حرارة مقدارها $T \geq 0.4\ T_m$ ، حيث أن T_m درجة إنصهار المادة المطلقة. ويكون المواد المتحولة مثل البلاستيك والمطاط حساساً للغاية لدرجة الحرارة.

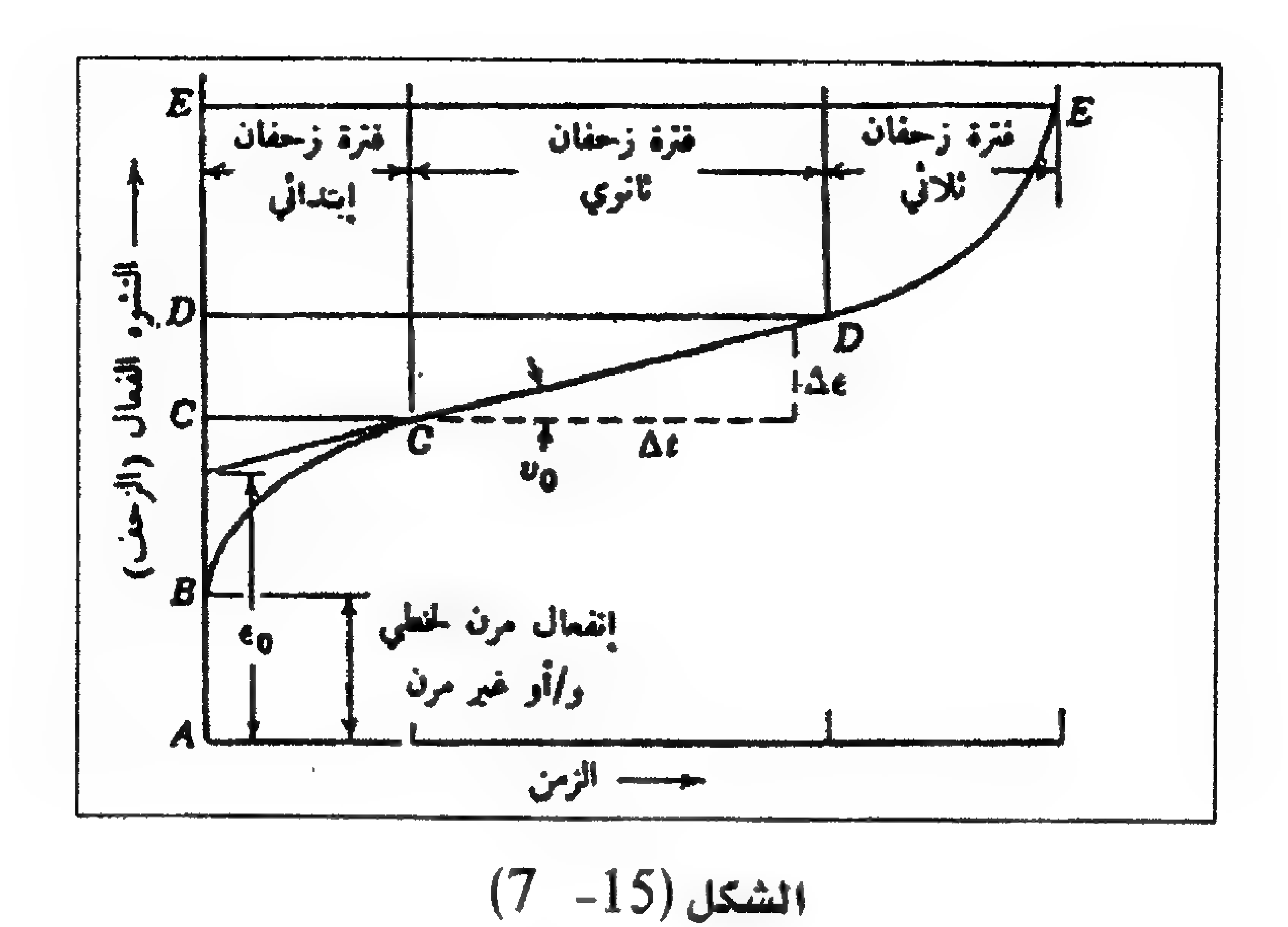
والطريقة العادية لإجراء فحص زحفان هو تطبيق إجهاد شد ثابت على العينة مع بقاء درجة الحرارة ثابتة وقياس مقدار الانفعال مع الزمن المستغرق أثناء الفحص. ويمكن أيضاً تعيين الزحفان بواسطة فحوصات الشد، القص والانحناء. ورغم أن مبدأ الفحص سهل إلا أنه يحتاج إلى جهاز مخبري كبير وعناية كبيرة ودقة فائقة حين إجرائه ويستغرق كل فحص عدة ساعات، أسابيع، شهور أو حتى سنوات. فمثلاً، أجريت بعض فحوصات الزحفان على الفلزات لمدة تزيد عن عشر

سنوات، والزمن التقليدي إجراء فحص زحفان على الفلزات يتراوح ما بين ألف وثلاثة آلاف ساعة، والطريقة العامة له تتبع المواصفات القياسية للجمعية الأمريكية لفحوص المواد (ASTM) ، 41 – 22 -E . وتمثل رسماً لمنحنى زحفان يتألف من الانفعال بدلالة الزمن المستغرق عند ثبات يدرجة الحرارة والإجهاد شكل (15- 4).

يبدأ فحص الزحفان بتطبيق حمل على العينة لفترة زمنية، ويمر التشويه (الاستطالة) بمراحل زحفان: أولها تشويه لحظي AB، ويليه زحفان أولي (أو انتقالي) BC، ثم يتبعه زحفان ثانوي (أو ثابت) CD، واخيراً زحفان ثلاثي(أو متسارع) DE أنظر الشكل (15- 7).

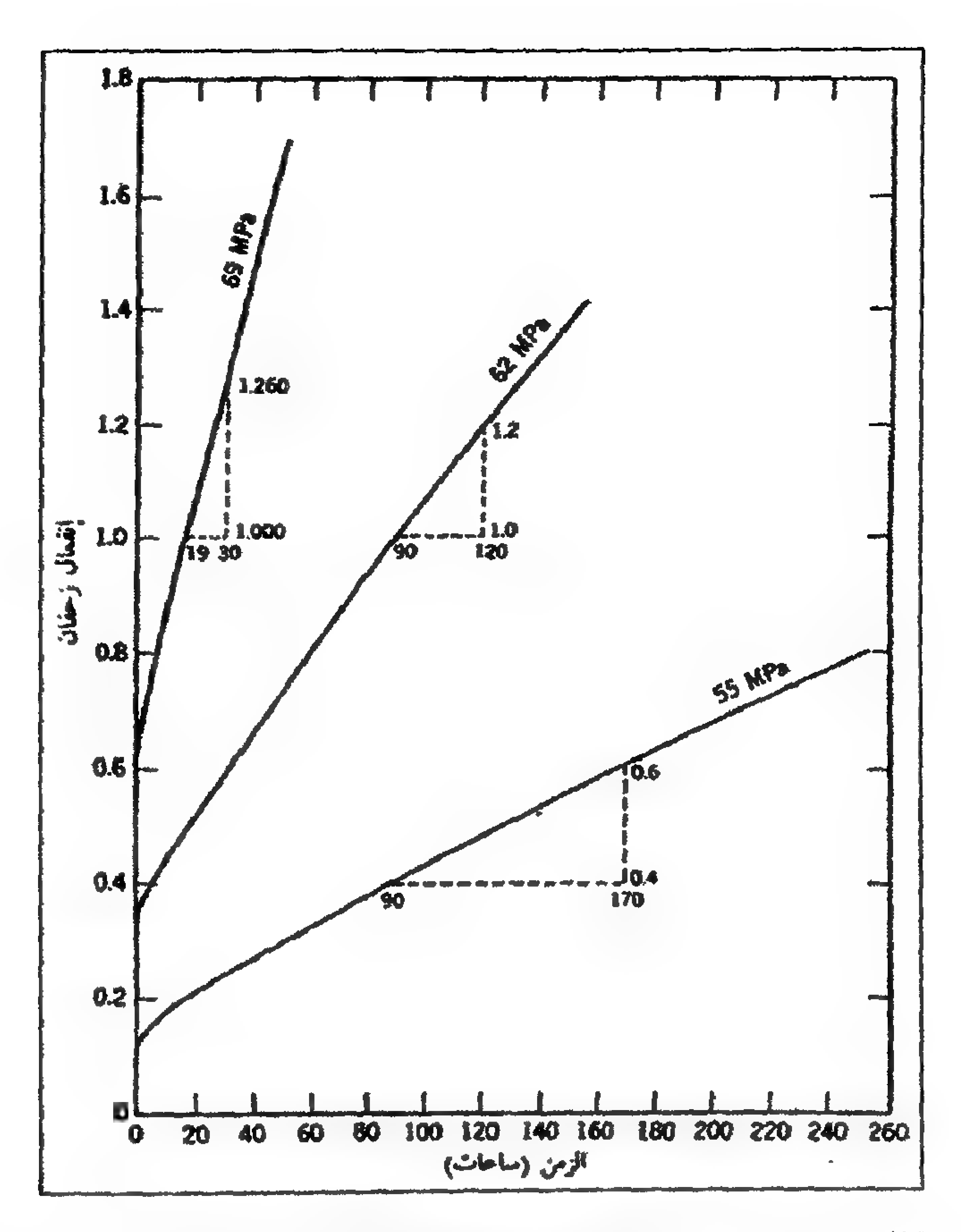
إن الزحفان الأول أو الانتقالي هو انفعال يتناقص معدله بسبب عملية النفسية بالشغل الناتجة عن التشويه وهو في الأساس يشبه في ميكانيكيته ظاهرة المرونة المتأخرة أو ردة الفعل المذكورة سابقاً. ومن هنا يتميز الزحفان الأولي بالاستعادة عند إزالة الحمل عن العينة.

ينتج الزحفان الثانوي الذي يمكن تسميته أيضاً بالزحان ذي المعدل الأدنى عن الاتزان الحاصل بين عملية التقسية بالشغل وظاهرة التلدين. وفي الأساس، يمكن أن يكون له مسلك لزج أو لدن، ويعتمد ذلك على كلما كان مسلك الزحفان أكثر لزوجة. ويتميز الزحفان ذو المعدل الأدنى بأنه حساس للغاية لدرجة الحرارة، ويمكن تمثيل اعتماده عليها بعلاقة من نوع المعادلة الأسية التي تم وصفها في ظاهرتي اللزوجة والانتشار.



الشكل (15- 7)

منحنى زحفان على درجة حرارة واجهاد ثابتين. يعين معدل الزحفان ذو الحد الأدنى $\Delta_\epsilon/\Delta t$ من ميل المنحنى v_0 في فترة الزحفان الثانوي (CD) ويمكن إيجاد الزحفان الكلي عند أي زمن t من العلاقة $\epsilon_1 = \epsilon_0 + v_0 t$ حيث أن ϵ_0 هو تقاطع الحظ CD مع محور انفعال الزحفان.



الشكل (16- 7) منحنيات زحفان لسبيكة المنيوم 24S-T4 أخذت على درجة حرارة ثابتة مقدارها 180°C واجهادات مختلفة (أخذ من المرجع)

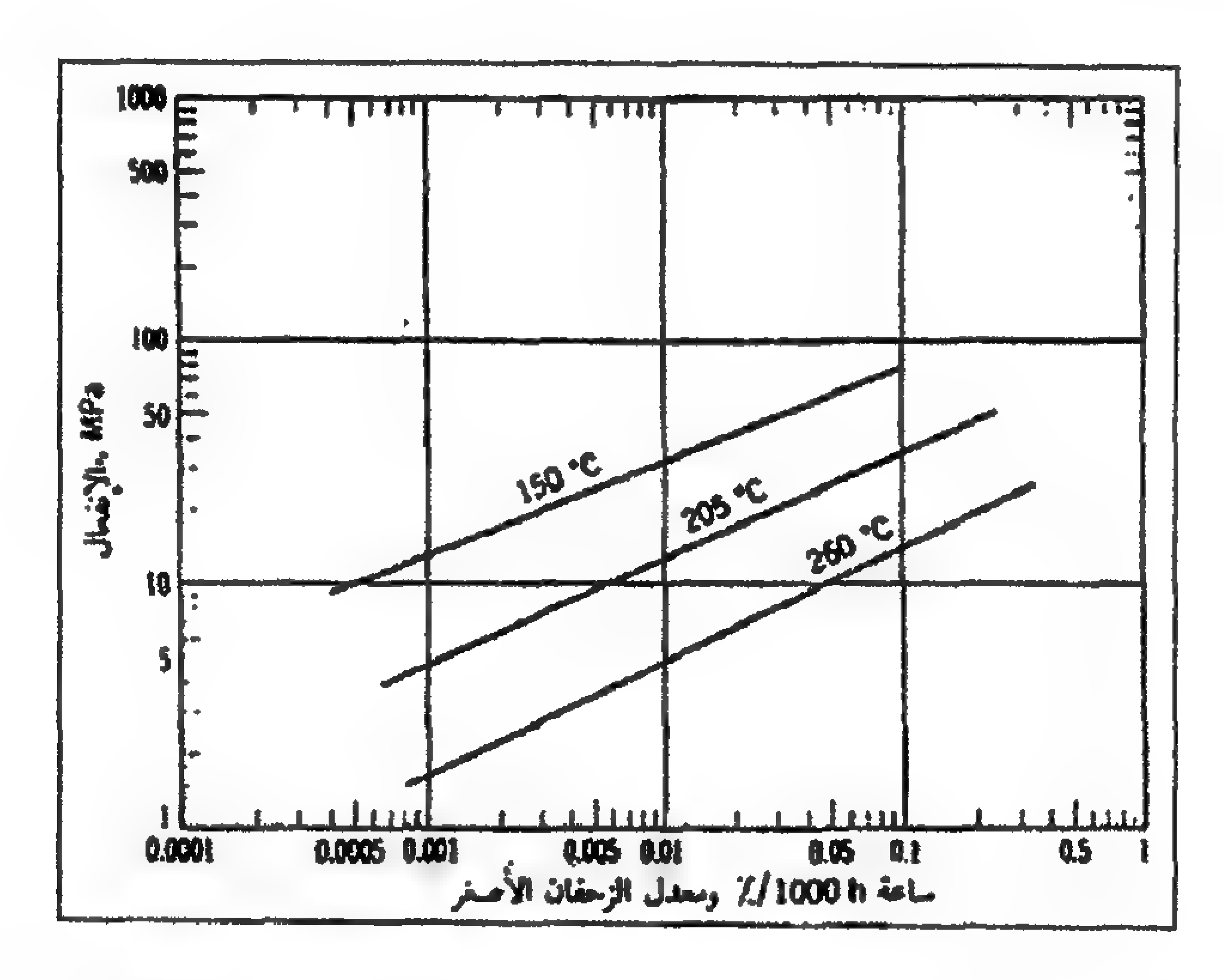
(R.L. Carlson and A.D. Schnoe, Proceddings of the 2nd U.S. Congress of Applied Machanics, ASME, 1954).

يقع الزحفان الثلاثي على معدل متسارع، وفي الحقيقة يمثل عملية تتميز بالاتلاف التدريجي الذي يؤدي إلى كسر المادة بسبب الانهيار البلوري البيني أو لأسباب أخرى.

تفسير نتائج الزحفان Interpretation of Creep Data :

تقدم فحوصات الزحفان عادة بيانات تربط الزحفان الكلي مع الزمن عند درجة حرارة ثابتة ومستويات إجهاد مختلفة. ولكل قيمة من الاجهاد. يمكن تعيين

معـل الزحفـان الأدنـى وذلـك بإيجـاد الميـل لمنحنـى الزحفـان في منطقـة الزحفـان الثانويـة، وبعدئـذ ترسـم معـدلات الزحفـان مـع قيم الاجهـادات المنـاظرة علـى منحنـى لـوغ – لـوغ، ويكـون المنحنـى النـاتج خطـأ مـستقيماً وفـق المعادلـة أعـلاه. وبتكـرار هـذا الرسـم علـى درجـات حـرارة أخـرى. تنـتج سلـسلة خطـوط مـستقيمة كمـا في شـكل (17- 7). ويمثـل كـل خـط معـدل الزحفـان الأدنـى لكـل قيمـة إجهـاد عنـد درجـة حـرارة ثابتـة. ويمـن تعـيين معـدلات الزحفـان مـن هـذه المنحنيـات لاجهـادات متعـددة ودرجـات حـرارة مختلفـة. ونـرى أنـه يلـزم فقـط قيمنـا إجهـاد لكـل درجـة حـرارة لرسـم منحنـى واحـد وعلـى الـصعيد العملـي، تؤخـذ القياسـات عـادة عنـد ثـلاث قـيم أو أكثـر للاجهـاد مـن أجـل تـدقيق وتجنـب الاخـتلافات في النتـائج المخبريـة. ونحـصل مـن هـذه الطريقـة علـى نتـائج دقيقـة شـريطة أن تحـدث تغـيرات تركيبيـة للفلـز أثنـاء الفحـص والتـي مـن شـأنها أن تغـير بـسرعة مـن قيمـة معـدل الزحفـان المأخـوذ تحـت إجهـاد معـين ودرجـة حـرارة ثابتـة.



الشكل (17- 7) منحنى لوغارتمي مزدوج يمثل العلاقة بين معل الزحفان ذو الحد الأدنى والاجهاد لعينة من النحاس الفوسفوري الملون (0.019 %P) على عدة درجات حرارة (أخذ من مرجع:

(A.I. Blank and H. L. Burghoff, Proceedings, 51, 983, Am,. Soc. Testing Materials 1951.

يكون الحد أضعف من المادة الواقع ضمن الدقيقة أو الحبيبة، مما يؤدي إلى وقوع الكسر على الحدود الحبيبية. وعند درجة التماسك المتساوي يكون الحد الحبيبي أقوى من الدقائق نفسها، عندئذ يقع الكسر عبر الحبيبات.

يكون تأثيراً معدل الانفعال والحرارة على كسر المادة متضادين. فمثلاً، يغلب وقوع الكسر البيّن حبيبي عند زيادة درجة الحرارة ونقصان معدل الانفعال. وعند ثبوت درجة الحرارة، يمكن أن يقع كل من الكسر البين حبيبي والكسر الحبيبي العابر. ويعتمد على معدل الانفعال. أما عند ثبوت معدل الانفعال فيعتمد نوع الكسر على درجة الحرارة.

وفي السلوك ذي الزمن الطويل، مثل الزحفان المذكورة سابقاً، فإن درجات الحرارة العالية ومعدلات الانفعال المنخفضة تسبب وقوع الكسر الحبيبي البيني، بينما تؤدي درجات الحرارة المنخفضة ومعدلات الانفعال العالية إلى وقوع الكسر الحبيبي العابر، ويمكن أيضاً أن يقع الانتقال أو التغير من الكسر الحبيبي البيني إلى الكسر الحبيبي العابر أثناء إجراء اختبار الزحفان لعينة ما بسبب تغيرات كيميائية تنتج عن تأكسد المادة. فإذا وقع مثل هذا التأكسد بين حبيبي للفلز، عندئذ ينخفض إجهاد الكسر بمقدار كبير.

الكلال Fatigue :

إذا كانت الاجهادات المؤثرة على المادة دورية فإن الكسر يمكن أن يقع عند إجهاد يقل عن المقاومة الساكنة العظمى لها. وتسمى هذه الظاهرة بالكلال، وتعتبر من أهم أشكال انهيار المواد بفعل الاجهادات الدورية والعكوسية.

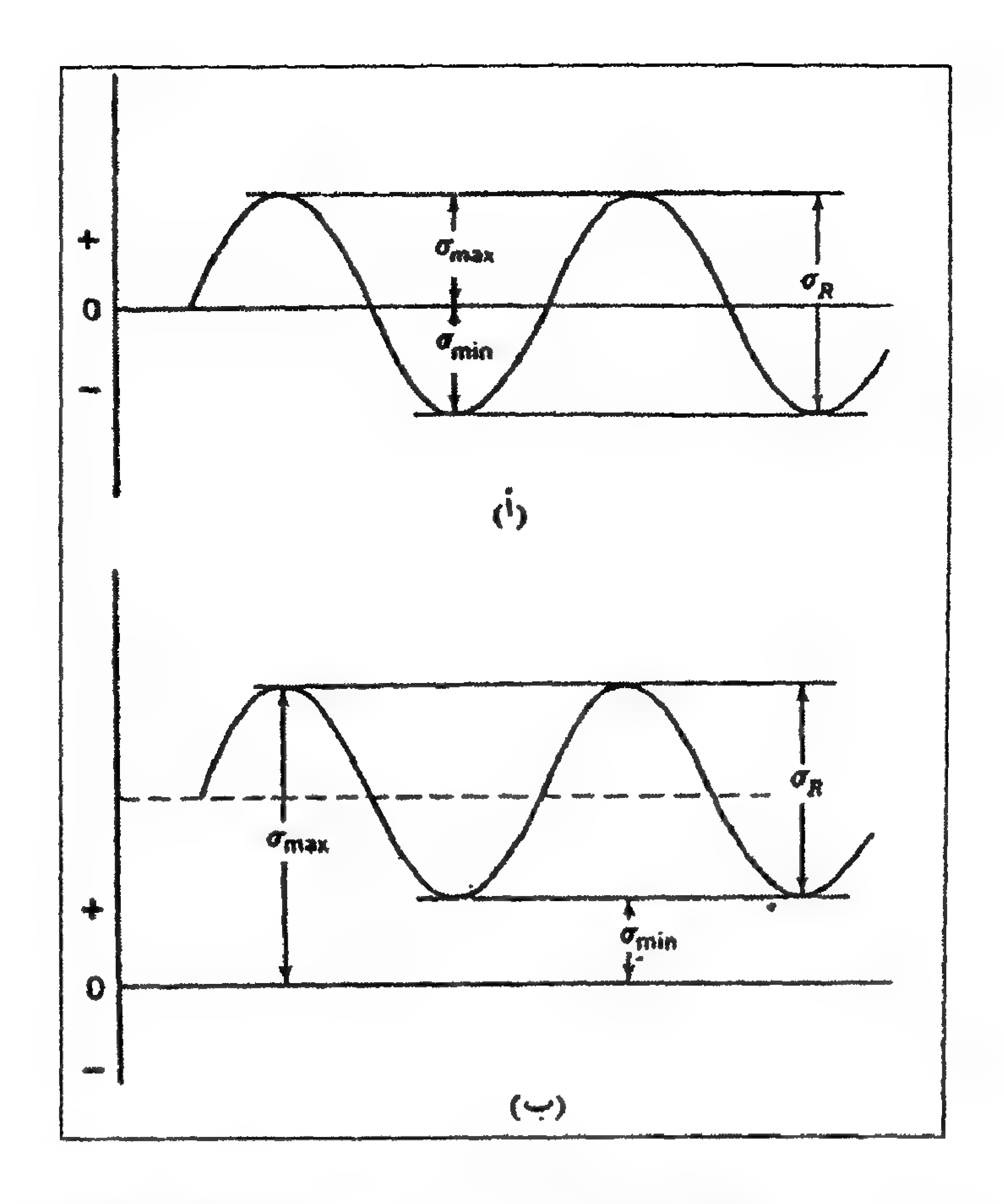
وقد وجد العالم بوشنجر Baushcinger أن حد التناسب للمادة الواقعة تحت تأثير إجهاد دوري ليس كمية ثابتة ولكنه حسب اتجاه تأثير الاجهاد نفسه. ووجد أثناء وقوع التشوه اللدن أن مقاومة المادة تزداد في اتجاه الانسياب اللدن. ولكن إذا عكس اتجاه الانفعال فإن التشوه اللدن يبدأ عند إجهاد إذعان يقل عن إجهاد

الإذعان عند التشوه اللدن الابتدائي وتعرف هذه الظاهرة باسم ظاهرة بوشنجر، ويمكن لها أن تلعب دوراً في تقليل مقدار الاجهادات المتخلفة وفي خلق إتلاف كلالي بواسطة التشوهات غير المرنة.

كما وجد أن تأثير الاجهادات الدورية يعمل على بدء ظهور الشذوخ الدقيقة على مراكز تراكيز الاجهاد داخل المادة أو على سطحها وبالتالي يؤدي إلى نمو وانتشار الشذخ الذي يسبب انهيارها. ويشمل الكلال كلاً من عمليات الانسياب الدقيق والاتساع الكبير للشذخ.

تتولد شذوخ الكلال في الفلزات على الدقائق السطحية التي تتكون من نطاقات الانزلاق (البلوري) وتمتد على مدى مستويات الانزلاق. وتعمل هذه النطاقات تحت تأثير الاجهاد العكسي على خلق الحفرات والنتوءات التي تعمل كقواعد لبدء الشذخ. ويمكن اعتبار عملية الكلال حدثاً متقدماً لتطوير وبدء الشذخ الكبير الذي يؤدي في النهاية إلى الانهيار الهش. ويستغرق انتشار الشذخ جزءاً كبيراً من عمر أو فترة الكلال. ويمكن وصف نمو الشذخ الناتج بواسطة الكلال بمعادلة باريس Paris التي وضعت لتفسير معدلات نمو الشذخ في الفلزات. ويمكن تطبيقها لحد معين على المبلمرات.

$$\frac{dl}{dN} = A(\Delta K)^m$$



الشكل (18- 7) إجهادات دورية σ_{max} و σ_{min} القيمتان العظمى والصغرى لاجهاد متكرر. مدى الاجهادات $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{mins}$ ومتوسط الاجهاد $(\sigma_{mins} + \sigma_{max})$ ⁄ $\sigma_{av} =$ (أ) معكوس. (ب) متغير.

حيث أن:

2L = **طول الشنخ.**

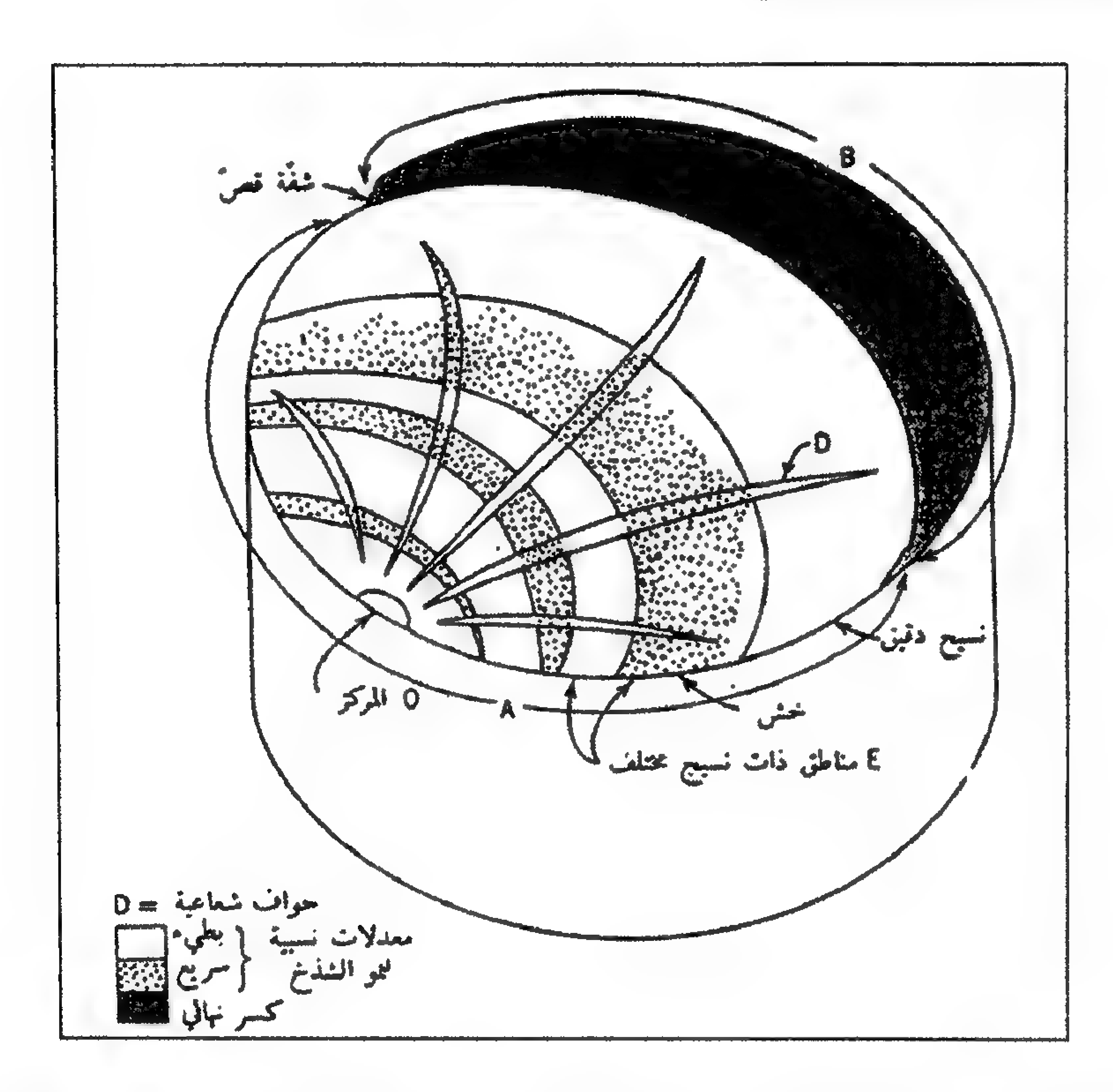
N = **عدد الدورات**

ΔK = **المدى لعامل شدة الاجهاد (حيث أن العامل** $K = \Delta\sigma \sqrt{l}$ **يعين نمو الشذخ)**

Δσ = **مدى إجهاد التقاطع**

m,A = **ثابتات يعتمدان على المادة والظروف.**

ويبين الشكل (19- 7) الخصائص العيانية macroscopic لسطح كسر نتج عن اختبار كلال (اعياء)، وبالرغم من عدم وجود شذخين كلاليين متشابهين، إلا أنه لجميعها خصائص مميزة عامة. وعادة تكون منطقة الكلال A ملساء وأكثر لمعاناً من منطقة الكلال النهائي B ذات النسيج الأكثر خشونة. ونستطيع أن نميز نقطة الأصل للكسر في منطقة الكلال، ثم يتبعها تكرار دوري من النطاقات المضيئة والخافتة، مبينة انتشار الشذخ.



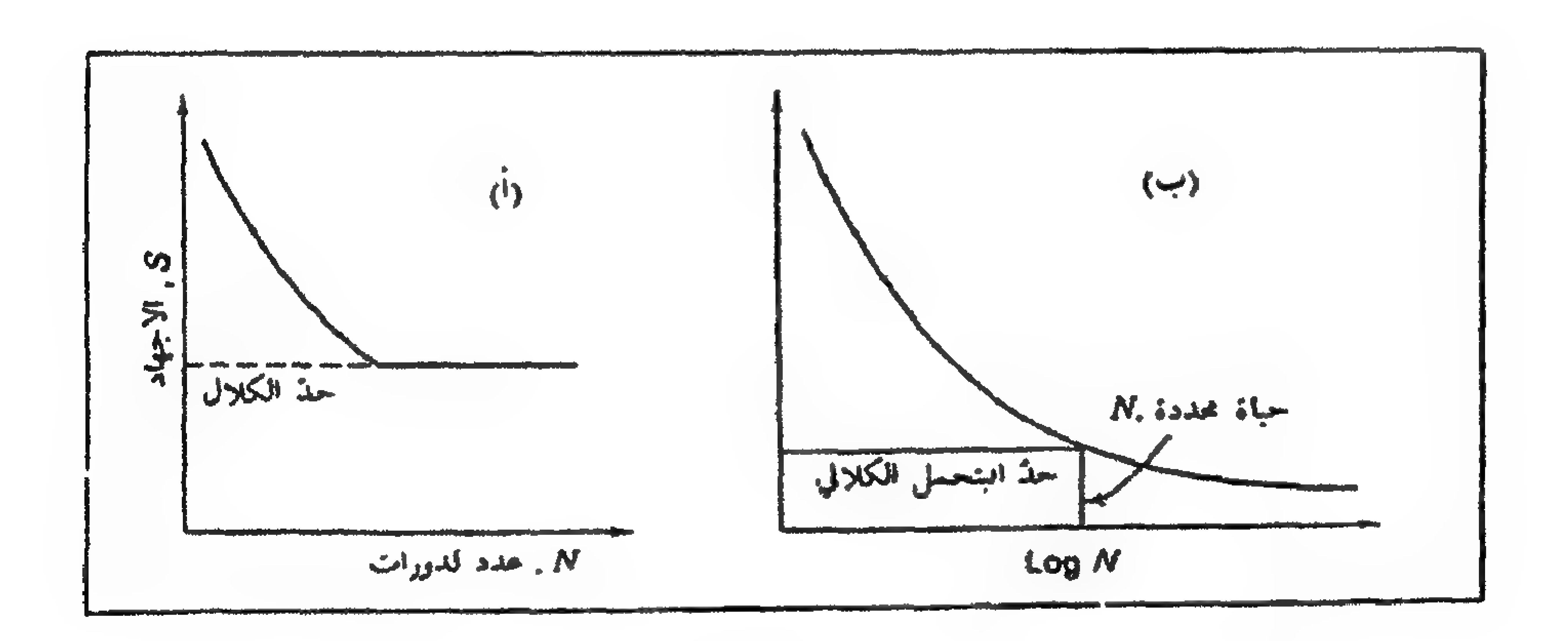
الشكل (19- 7) خصائص عيانية لكسر كلالي يقع عادة في الفلزات (أخذ من المرجع: The Phsical Basic of Matal Fatique by P.J. Forsyth, Blackie & Son Limited, Bishopbriggs, Glasgow G 64 2NZ).

تتألف حياة الكلال أو احتمال endurance الكلال من فترة أو دورة تؤدي إلى ظهور الشذخ الأول المتضمنة مولد الشذخ وفترة نموه. ويعرف حد الكلال بأكبر إجهاد يمكن تطبيقه دورياً لعدد لا نهائي من المرات دون كسر المادة (الشكل 20- 7) ويقدر احتمال الكلال أو حد التحمل بأقصى يمكن تطبيقه على مدى عدد

محدد من دورات الاجهاد دون حدوث انكسار للمادة الواقعة تحت تأثير الكلال (أنظر الشكل 2- 4ب).

وهناك بعض المواد مثل الفلزات الحديدية والسبائك تظهر حداً كلالياً واضحاً ومحدداً، بينما توجد مواد أخرى مثل الفلزات غير الحديدية والسبائك (نحاس ، ألمنيوم، ماغنيسيوم) لا تظهر حداً كلالياً حقيقياً. ولكن يمكن تعيين مقاومة الكلال للفئة الأخيرة من معرفة حد التحمل endurance limit لها. ويقل حد الكلال بمقدار كبير عن حد المرونة، مما يتضمن وقوع حركة انخلاعية عند إجهاد يقل عن نقطة الإذعان على منحنى الاجهاد – الانفعال. كما أن مقاومة الكلال ترتفع كلما نقص الحجم الدقائقي، مما يدل على أن الحدود الحبيبي تعمل على إعاقة انتشار الشذخ الكلالي.

وحينما يبدأ الشذخ الكلالي في التكوين تصب تراكيز الاجهاد التي تأخذ شكل حزوز خطية عاملاً هاماً.



الشكل (20- 7) شكل لمنحنيات الكلال. (أ) حد الكلال. (ب) حد التحمل الكلالي لعدد معين من الدورات.

وعندئذ لا يمكن منعه من إكمال لإنهيار. وتقع الغالبية العظمى من الشذوخ الكلالية عند درجات حرارة منخفضة نسبياً تقدر بحوالي 0.2 إلى 0.3 من نقطة انصهار المادة، وتكون على هيئة شذوخ عابرة للبلورات transcrystalline على

كل حال، إذا ارتفعت درجة الحرارة لتصل حوالي $0.55\ T_m$ (نقطة الانصهار)، فإن الانهيار الكلالي يمكن ن يتغير من كونه حبيباً عابراً على حبيباً بينياً. ويضبط هذا التحول بواسطة الحجم الدقائقي أو وجود عناصر خلط للسبائك alloying.

وقد نالت ميكانيكية كسر المبلمرات بواسطة الكلال دراسة أقل من الفلزات والسبائك الأخرى. ويظهر لهذه المواد حد كلالي كما هو الحال في الفلزات، رغم أن قيمته تقل بازدياد التردد. وبوجه عام تكون عمليات الكلال في المبلمرات أكثر تعقيداً في طبيعتها، وربما تقع عملية بدء الشذخ خلال المادة نفسها. ويتضمن المظهر العياني للكلال زيادة اللانفاذية opacity للمبلر الواقع تحت تأثير اختبار الكلال وتكويناً تدريجياً لشذوخ يمكن رؤيتها. ويبدأ الاتلاف الكلالي في المواد المركبة في مرحلة ويشمل على تحلل للروابط الموجود بين السطوح والتي تؤدي إلى تكوين شذوخ متناهية في الصغر وبالتالي إلى نموها وانتشارها.

وجدير بالملاحظة أن مادة الخرسانة لا تظهر حداً كلالياً، وتقدر مقاومة الكلال لها (حد التحمل) بحوالي 55% من مقاومتها الساكنة عند استخدام عدد من الدورات أو الذبذبات يبلغ $N = 10 \times 10^6$. وتنتج الشذوخ أو الكسر الكلالي من إتلاف الترابط بين العجينة اللاحمة والتجمعات المعدنية. وقد لوحظ أن الكسر الكلالي (عند استخدام عدد معين من الذبذبات) يقع عند نفس الكسر عن المقاومة الساكنة للخرسانة ولا تعتمد على هذه المقاومة أو عمر الخرسانة.

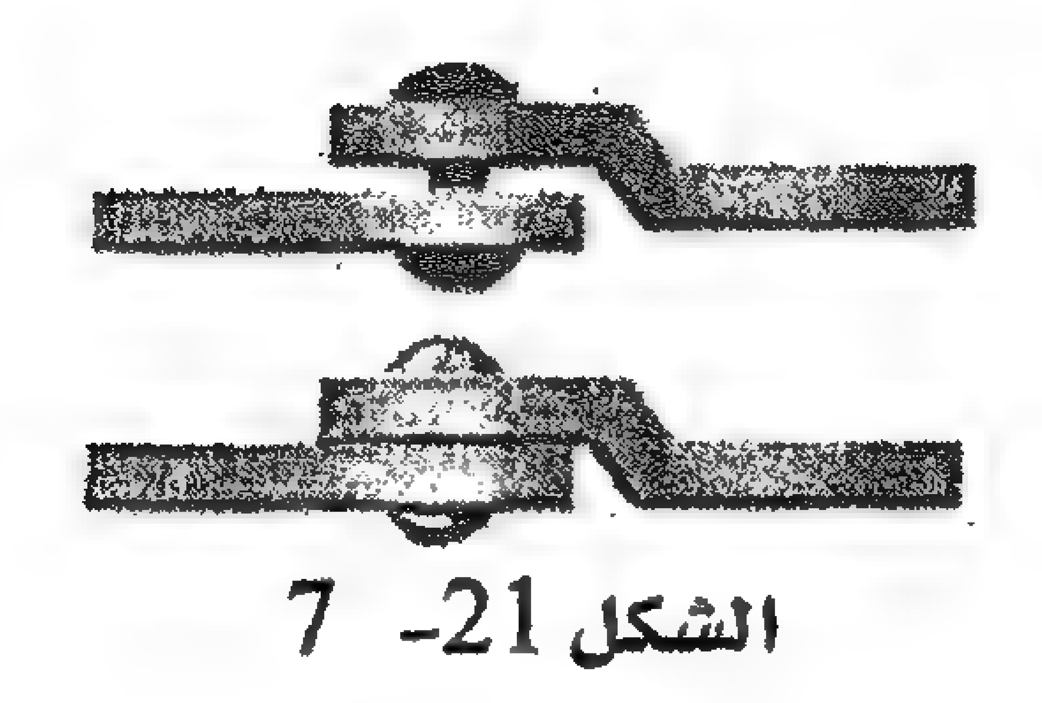
التمدد والتوصيل الحراري:

تتأثر جميع المعادن بالحرارة سوا أكان ذلك من ناحية التوصيل أو التمدد، ويختلف مقدار هذا التأثير من معدن إلى آخر، وبالتالي يمكن اعتبار التمدد والتوصيل الحراري من الخواص التي تميز المعدن عن باقي المعادن.

تتمدد المعادن بالحرارة في جميع الاتجاهات وتتقلص بالتبريد ويمكن القول أن مقدار هذا التمدد أو التقلص لا يكون كبيراً بحيث يمكن ملاحظته بالعين

المجردة، ولكن يمكن قياسه وهو بالتالي مهم جداً في الحياة العملية، حيث يمكن الاستفادة من هذه الخاصية في نواحي عملية متعددة، وفيما يلي بعضاالأمثلة على ذلك:

1. تستخدم البراشيم الساخنة لتوصيل قطعتي معدن كما في الشكل (21- 7) وعندما تبرد هذه البراشيم فإنها تتقلص لتضغط قطعتي المعدن إلى بعضها البعض بقوة دون أن تترك بينهما فراغ.



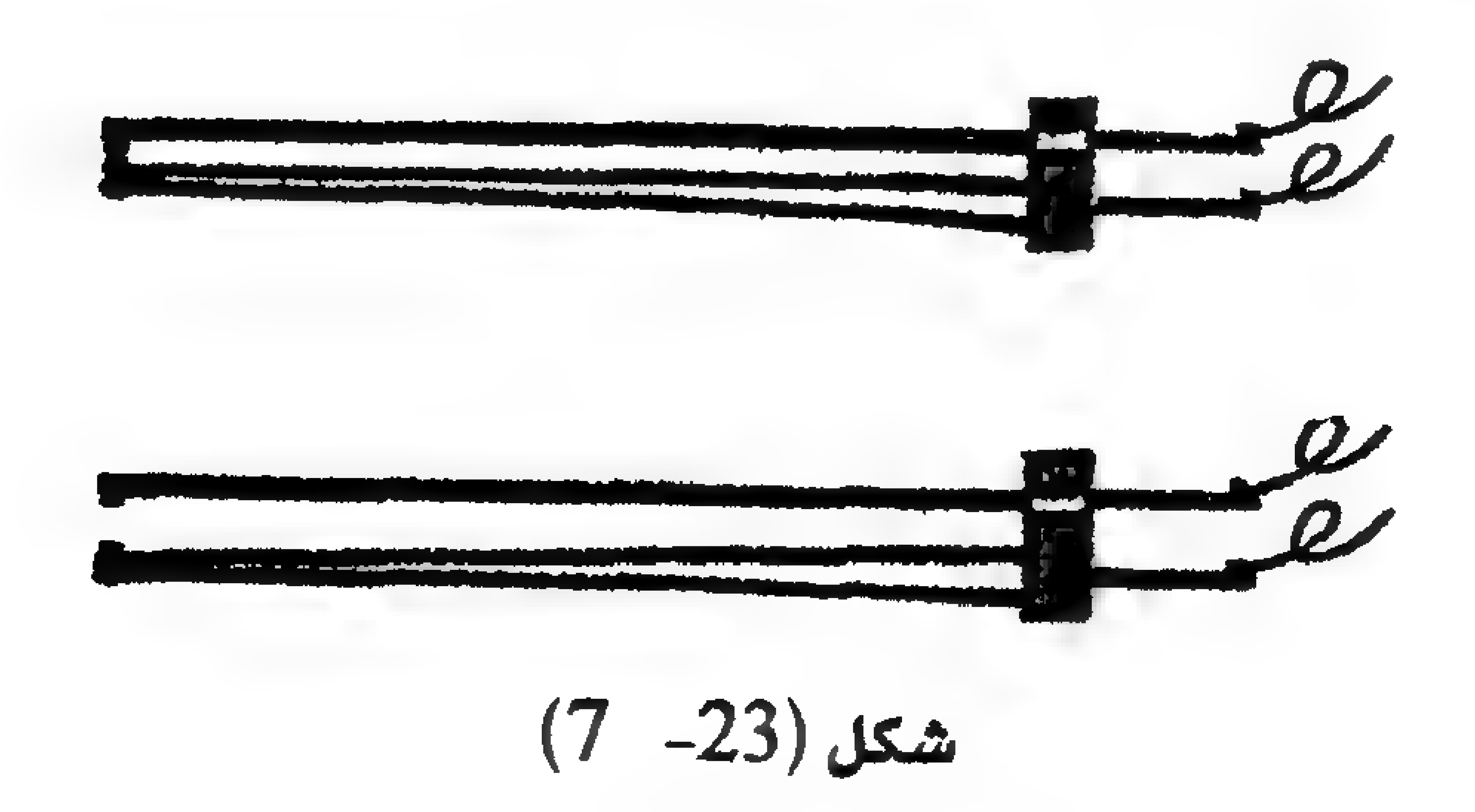
الشكل 21- 7

2. يستفاد من خاصية التقلص عند التبريد للمساعدة في إدخال القميص في سكبه المحرك كما في الشكل (22- 7) حيث يتم تبريد القميص لدرجة حرارة منخفضة جداً بوضعه داخل وعاء يحتوي على أكسجين سائل فيتقلص القميص وبذلك يمكن إدخاله بسهولة داخل سكبة المحرك وعندما ترتفع درجة حرارته إلى درجة حرارة الغرفة يتحدد قليلاً فيثبت في مكانه.



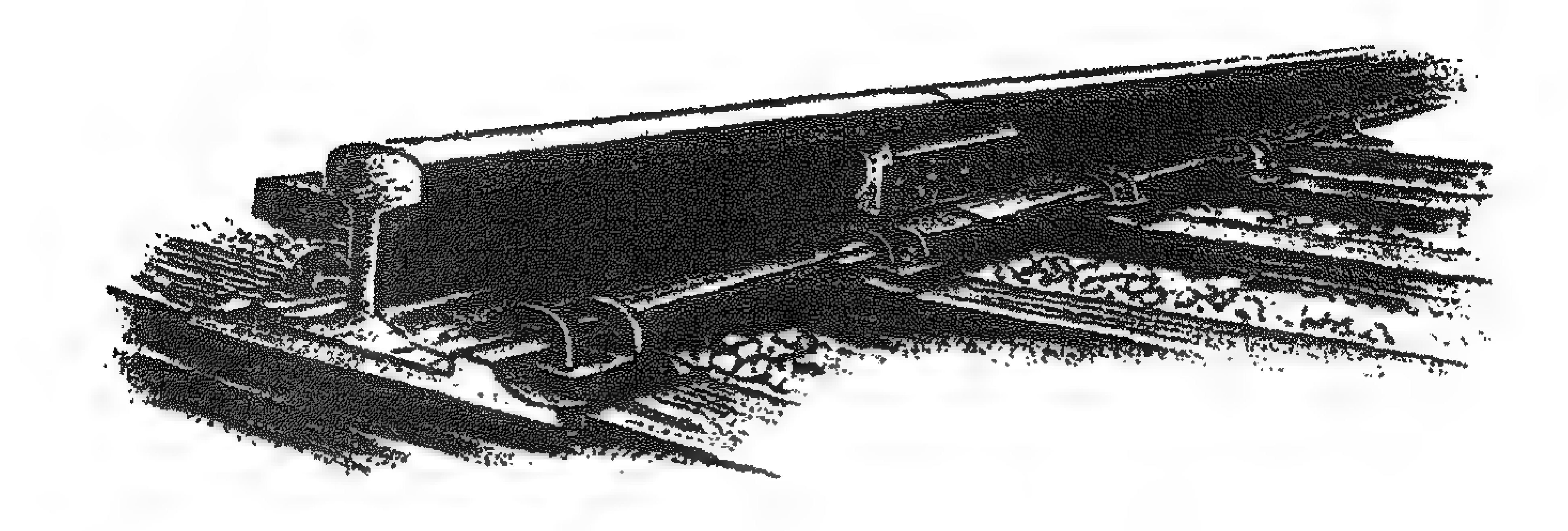
شكل (22- 7)

3. نظام التحكم في درجات الحرارة (ثيرموستات) كما في الشكل (23- 7) يتمدد القضيبين السفليين بمقادير مختلفة (نظراً لاختلاف المعدن) وبما أنهما متصلان مع بعضهما البعض عند الطرف فإن ذلك يؤدي إلى الإنحناء وبالتالي قطع الدائرة الكهربائية عندما يصل مقدار التحدد إلى المقدار المناسب (درجة الحرارة المناسبة).



شكل (23- 7)

4. يتم تثبيت قضبان السكك الحديدية مع وجود فواصل بينها تسمى فواصل عدد، فلو حصل التحدد وكانت القضبان متلاصقة لأدى ذلك إلى انحناء وتقوس هذه القضبان.



شكل (24- 7)

تمدد المعادن عند ارتفاع درجة حرارتها نظراً لأن الذرات تكتسب كمية إضافية من الطاقة فتبدأ بالاهتزاز الموضعي فتدفع بالذرات المجاورة بعيداً وبذلك يحدث التمدد.

قياس التمدد:

لكي تتم الاستفادة من خاصية التمدد الحراري يجب معرفة مقدار الزيادة في الحجم أو مساحة السطح أو طول الجسم المعدني الناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة، حيث تتمدد المعادن (كما السوائل والغازات) في جميع الاتجاهات، فيكون التمدد إما حجمي (الزيادة في حجم الجسم الناتجة عن ارتفاع دجة الحرارة) أو سطحي (الزيادة في طول الجسم الناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة).

تسمى الزيادة في طول قضيب معدني طوله 1m والناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة بمقدار $1\ ^\circ C$ "معامل التمدد الطرلي" والجدول المرفق يبين معامل التمدد الطولي لبعض المعادن والمواد الشائعة.

تتم عملية قياس معامل التمدد الطولي كما في الشكل (25- 7) بتثبيت قضيب معدني طوله 1 m وتوضع ساعة القياس على طرفه في وضع الصفر ويثبت الطرف الآخر، ويتم إدخال بخار الماء عند درجة حرارة محددة وبعد التأكد من ثبات درجة الحرارة يتم رفعها بمقدار $1\,^{\circ}C$ ونأخذ قراءة ساعة القياس التي تحدد مقدار الزيادة في الطول، وبما أن فارق درجات الحرارة كان بمقدار $1\,^{\circ}C$ فإن هذه الزيادة في الطول هي معامل التحدد الحراري لهذا المعدن.

بشكل عام يتم إيجاد الزيادة في الطول الناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة حسب المعادلة التالية:

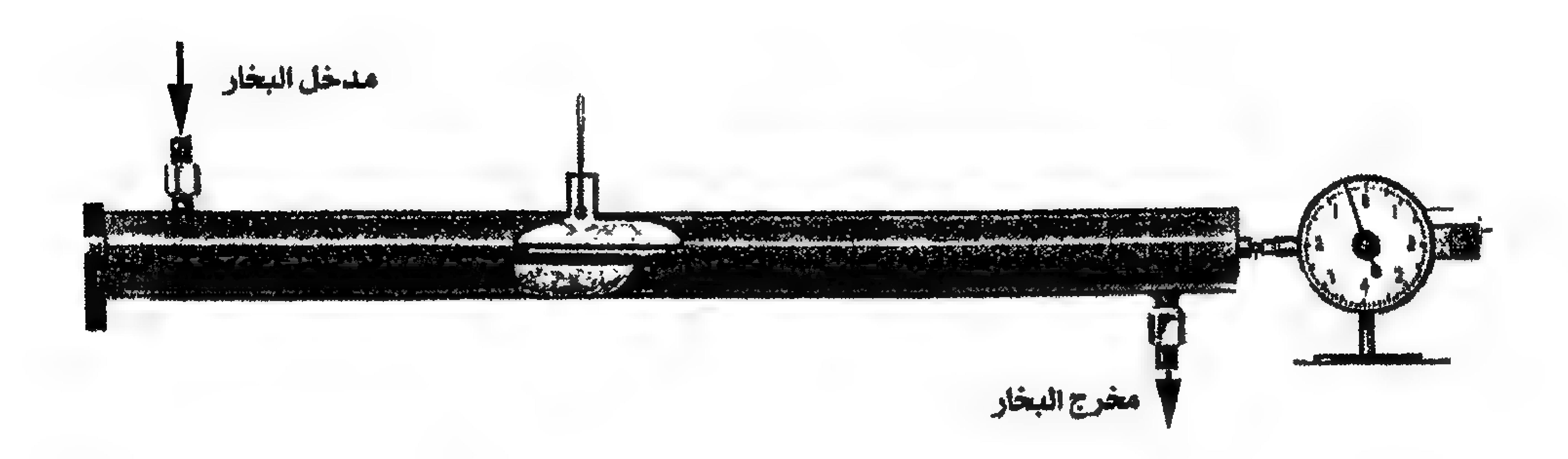
$$\Delta L = \delta \times L \times \Delta T$$

حيث:

ΔL : الزيادة في الطول.

δ: معامل التمدد الطولي.

ΔT: فارق درجات الحرارة.



شكل (25- 7)

معامل التمدد الحراري لبعض المواد	
الألمنيوم	$0.000023/^{\circ}C$
النحاس الأصفر	$0.000018/^{\circ}C$
النحاس الأحمر	$0.000017/^{\circ}C$
الاسمنت	$0.000014/^{\circ}C$ تقريباً
حديد السكب	$0.000011/^{\circ}C$
البلاتين	$0.000009/^{\circ}C$
زجاج البيركس	$0.000003/^{\circ}C$
الفولاذ	$0.000012/^{\circ}C$

المراجع

1. خواص المواد الهندسية د. صالح كركي.
2. طبيعة وخواص المواد الهندسية ج1، ج2.
3. Material Science and Engineering An Introduction . William D. Callistev Jr.
4. التبالورجيا الهندسية A-Higgins أ. هيكينس.


مكتبة المجتمع العربي
للنشر والتوزيع


مكتبة المجتمع العربي
للنشر والتوزيع

علم المواد الهندسية





الأردن - عمان - وسط البلد - ش. السلط - مجمع الفحيص التجاري
تلفاكس: 96264632739+ - خلوي: 962795651920+ ص.ب. 8244 عمان 11121 الأردن
ش. الملكة رانيا العبد الله - مقابل كلية الزراعة - مجمع سمارة التجاري
Email: Moj_pub@yahoo.com - info@ muj-arabi-pub.com
www.muj-arabi-pub.com
مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع


9789957525590